

**SÄILÖREHUNKORJUUN REAALIAIKAINEN SADONMITTAUS
KORJUUN YHTEYDESSÄ PYÖRÖPAALAUKSESSA**

Juho Kalliomäki
Maisterintutkielma
Helsingin yliopisto
Maataloustieteiden laitos
Agroteknologia
Marraskuu 2020

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Maataloustieteiden laitos	
Tekijä — Författare — Author Juho Kalliomäki			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Säilörehunkorjuun reaaliaikainen sadonmittaus korjuun yhteydessä pyöröpaalauksessa			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agroteknologia			
Työn laji — Arbetets art — Level Maisterintutkielma		Aika — Datum — Month and year Marraskuu 2020	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 58 s.
<p>Tiivistelmä — Referat — Abstract</p> <p>Nautaeläintiloilla säilörehun riittävyys talven yli on tärkeää. Toisinaan rehusta saadaan heikko sato ja tällöin voidaan joutua turvautumaan ostorehuun. Oman rehusadon riittävyyden arviointia helpottaisi, jos tilalla olisi tiedossa jo syksyllä käytettävissä olevan rehun määrä. Tarkka sadon määrän mittaaminen auttaa tilallista arvioimaan rehun riittävyyttä.</p> <p>Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia pyöröpaalauksen reaaliaikaista sadonmittausta. Reaaliaikainen sadonmittaus mahdollistaa tarkkaa tiedon keräämistä pellolta sadonkorjuun aikana. Mitattujen satomäärien avulla tilallisen on helpompaa suunnitella tulevan talven ruokintaa. Sen lisäksi satotiedon avulla pystytään suunnittelemaan tulevia viljelystoimia satotasojen parantamiseksi.</p> <p>Tutkimuksessa pyöröpaalaimen asennettiin mittalaitteita mittaamaan paalin muodostumista paalauksen aikana. Paalien punnitukseen käytettiin venymäliuska-antureita, jotka mittaivat paalaimen akselin taipumista. Lisäksi tutkittiin paalin muodostumisen aikana traktorin ja paalaimen väliseen nivelakseliin kohdistuvaa vääntömomenttia ja pyörimisnopeutta. GPS-vastaanottimen avulla pystyttiin seuraamaan traktorin liikkeitä pellolla. Mittaukset suoritettiin kesällä 2015 Viikin opetus- ja tutkimustilan pelloilla tilan omaan paalaimen asennetuilla mittalaitteilla.</p> <p>Mittauksia tehtiin useista paalauskerroista. Kesän ensimmäiset mittaustulokset osoittautuivat virheellisiksi ja laitteiston toimintaa parannettiin kesän edetessä. Syksyllä paalatulta nurmipelloilta saatiin vertailukelpoista mittaustietoa kerättyä. Jotta voitiin varmistua tulosten luotettavuudesta, punnittiin yhdeltä nurmilohkolta paalatut 97 paalia erillisellä vaa’alla ja verrattiin tuloksia mittalaitteella mitattuihin tuloksiin. Tulokset osoittivat, että mittalaitteella pystytään mittaamaan paalien paino suhteellisen tarkasti. Keskiarvoisesti tarkasteltuna tästä 97 paalin otannasta mittalaitteilla punnitut paalit olivat keskimäärin 20 kiloa kevyempiä kuin puntarilla punnittuna. Mittalaitteilla mitatuista paaleista 63 % oli ± 90 kilon sisällä puntarilla punnittuihin verrattuna. Mittaustulosten avulla piirrettiin satokartta kuvaamaan pellon satotasoja.</p> <p>Tutkielmassa rakennetut mittalaitteet osoittautuivat hienosäädön jälkeen hyväksi menetelmäksi pyöröpaalaimen paalien punnitukseen. Tutkimuksessa esitetty mittaajärjestelmä vaatii lisätyötä, jotta siitä tulisi kuluttajaystävällinen ja koneen käyttäjän helposti hallittava.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Pyöröpaalaus, satotaso, punnitseminen, tarkkuusviljely, säilörehu, satokartta			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Maataloustieteiden laitos ja Viikin kampuskirjasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Työtä ohjasivat Mikko Hakojärvi ja Laura Alakukku			

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos — Institution — Department Department of Agricultural Sciences	
Tekijä — Författare — Author Juho Kalliomäki			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Real-time yield measurement for silage during harvesting on round baling			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agrotechnology			
Työn laji — Arbetets art — Level Master's thesis		Aika — Datum — Month and year November 2020	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 58 p.
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>On cattle farms, the sufficiency of silage over the winter is important. Sometimes silage yields are poor, and one may have to resort to purchase more feed. It would be easier to know how sufficient your silage is, if the exact amount of silage is known in the autumn. Accurate yield determination helps farmer to assess the sufficiency of silage.</p> <p>The aim of this study was to investigate the real-time yield measurement of round baling. Real-time crop measurement allows accurate data collection from the field during harvest. The measured yield amount helps farmer to plan feeding for the coming winter. In addition, yield data can be used to plan future site-specific cultivation activities to improve yield level.</p> <p>In this study, measuring devices were installed to the round baler to measure bale formation during baling. Strain gauges, which measured the deflection of the balers shaft, were used to weigh the bales. In addition, the torque and rotation speed of the PTO (power take-off) shaft between the tractor and the baler during bale formation were determined. The GPS receiver made it possible to track the movements of the tractor in the field. The measurements were performed in the fields of Viikki research farm in the summer of 2015 with measuring devices installed in the farm's own baler.</p> <p>Measurements were carried out on several baling times. The first measurement results of the summer turned out to be incorrect and the operation of the equipment was improved as the summer progressed. Valid and comparable measurement data were collected from the baled grass field in the autumn. To ensure the reliability of the results, 97 bales baled from one grass field were weighed on a separate scale and the results were compared with the results measured with a measuring device. According to the results, the measuring device was able to determine the weight of the bales relatively accurately. On average, from this sample of 97 bales, the bales weighed with measuring devices were on average 20 kilos lighter than those weighed with the scale. 63 % of the bales measured with measuring devices were within ± 90 kilos of the weighed bales. Measurement results were utilized to prepare a yield map to describe the variation of yield levels on the field.</p> <p>The measuring devices built in the study proved to be a good method for weighing round bales during harvest after fine-tuning. The measurement system presented in the study requires additional work to make it consumer-friendly and easy for the machine operator to control.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Round baling, crop yield, weighing, precision farming, silage, yield map			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Department of Agricultural Sciences and Viikki Campus Library			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Supervisors Mikko Hakojärvi and Laura Alakukku			

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	6
2 KIRJALLISUUS	7
2.1 Sadonmittaus työkoneissa	8
2.2 Sadonmittaus pyöröpaalauksessa	9
3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	10
4 AINEISTO JA MENETELMÄT	11
4.1 Mittalaitteet	11
4.1.1 Venymäliuskat	11
4.1.2 Venymäliuskojen mittaaminen	13
4.1.3 Paikannus	14
4.1.4 Vääntömomentti ja pyörimisnopeus	15
4.1.5 Paalaimen kammion avautumisen tunnistus	15
4.1.6 Puntari paalien punnitusta varten	16
4.2 Mittalaitteiden rakentaminen ja asentaminen	16
4.3 Tiedonkeruu	18
4.4 Mittalaitteiden kalibrointi	19
4.4.1 Vääntömomentin ja pyörimisnopeuden kalibrointi.....	19
4.4.2 Venymäliuskojen kalibrointi.....	21
4.5 Kenttämittaukset	23
4.6 Satokartan muodostaminen	23
4.7 Mittaustulosten käsittely	24
5 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	25
5.1 Ensimmäiset peltomittaukset	25
5.1.1 Vääntömomentti ja pyörimisnopeus kolmen paalin tarkastelussa	28
5.1.2 Venymäliuskojen toiminta kolmen paalin tarkastelussa	30
5.1.3 Mittalaitteiden kehittäminen edelleen	32

5.2 Edelleen kehitetyillä mittalaitteilla punnittujen paalien massojen vertailu	32
5.2.1 Kolmen paalin mittaustulokset.....	34
5.2.2 Kaikkien punnittujen paalien mittaustulokset.....	42
5.2.3 Traktorin tehontarve.....	43
5.3 Satokartta 12.8.2015 paalatulle nurmisadolle	44
5.4 Tulosten tarkastelu	46
5.4.1 Mittalaitteiston luotettavuus.....	47
5.4.2 Mittalaitteiden kehittäminen	47
5.4.3 Satokartta	48
6 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	49
LÄHTEET.....	51
LIITE 1. VENYMÄLIUSKOJEN KALIBROINNIN TULOKSET.....	54
LIITE 2. OHJELMAKOODI MITTAUSDATAN KERÄÄMISEKSI.....	54
LIITE 3. PUNNITTUJEN JA MITATTUJEN PAALIMASSOJEN TULOKSET 12.8.2015 KORJATULLE NURMIREHUSADOLLE.....	56

1 JOHDANTO

Säilörehunkorjuu on tärkeässä osassa suomalaisilla nautatiloilla. Suomessa on paljon nautaeläimiä, jotka tarvitsevat tuottavuuden takaamiseksi laadukasta rehua ympäri vuoden. Nurmipinta-alaa Suomessa oli vuonna 2019 noin 591 000 hehtaaria, ja tältä alalta rehusatoa kerättiin yli 9 200 miljoonaa kiloa (Luke 2020). Kotieläintiloilla rehusatojen riittävyys pitkän talven yli on erittäin tärkeää. Rehusadon ollessa jonain vuonna alhainen, voi rehun riittävydessä olla ongelmia (Rinne ym. 2010). Jos omat rehut ovat vähissä, voi muilla viljelijöillä olla sama ongelma. Tällöin ostorehun hinta voi nousta korkeaksi tai rehun saanti voi olla hankalaa (Lehtonen 2019).

Jokainen kotieläintilallinen haluaa tietää jo syksyllä, paljonko omissa varastoissa on säilörehua talven ruokintaa varten. Silmämääräisesti pystytään arvioimaan, paljonko varastoissa on rehua jäljellä. Silmämääräinen arviointi ei kuitenkaan aina riitä, ja olisikin hyvä tietää tarkka jäljellä oleva rehumäärä. Erityisen suuria vaikeuksia aiheuttaa pyöröpaalauksessa syntyvien paalien rehumäärän arviointi. Paalit voivat olla hyvin eri painoisia johtuen paalauksen sääolosuhteista ja siitä kuinka kuivaa nurmi on korjattaessa. Samalla paalaimella paalatuissa paaleissa voi olla kuiva-ainepitoisuuden mukaan eri painoinen määrä säilörehua (Heikkilä ym. 2008). Tällöin kokonaisrehumäärän arviointi on vaikeaa, vaikka tiedettäisiin paalien tarkka lukumäärä. Kotieläintilallinen todennäköisesti tietää montako paalia kesän aikana on paalattu, mutta tarkkaan ruokintasuunnitteluun ei riitä ainoastaan paalien lukumäärä. Tärkeämpää on saada tietää, montako kiloa rehua yhdessä paalissa on, jotta saadaan laskettua koko kesän sadon määrä ja rehun riittävyys talven yli.

Reaaliaikainen sadonmittaus on rehunkorjuutilanteissa melko haastavaa. Koneiden liikkuesssa pelolla tärinä ja pomppiminen aiheuttavat paljon kohinaa ja häiriötä mittalaitteisiin. On tärkeää saada kehitettyä laitteita, joilla saadaan mitattua tarkasti satomääriä koneiden työskennellessä pelloilla. Tällöin tilalla tiedetään tarkasti, paljonko rehua on varastoissa käytettävissä ja saadaan tärkeää tietoa peltojen satotasosta. Satotasojen avulla pystytään suunnittelemaan tulevia viljelytoimia satojen parantamiseksi. Ruokintoja suunnitellessa voi ottaa huomioon varastoissa oleva rehun määrä ja tiedetään riittävätkö rehuvarastot seuraavaan säilörehunkorjuuseen asti.

2 KIRJALLISUUS

Täsmäviljelyn hyödyntäminen on lisääntynyt maataloudessa runsaasti, ja suomalaisista maataloista noin joka kymmenes tila hyödyntää tuotannossaan automaatiotekniikkaa (Karttunen 2019). Tekniikan kehittyessä ja halventuessa yhä useammalla tilalla on varaa parantaa viljelyn tarkkuutta teknologian keinoilla. Parempi tuottavuus samalla pinta-alalla lisää työtehokkuutta ja lisää työn kannattavuutta (Heacox 1998). Paikkakohtaisen sadon määrän mittauksen avulla voidaan luoda karttoja, joiden avulla viljelijän on helpompaa suunnitella tulevia lannoituksia ja maan parannustoimia (Rains ja Thomas 2009).

Yksi yleisimmistä käytössä olevista täsmäviljelyn menetelmistä on ajo-opastus (Karttunen 2019). Tämän järjestelmän avulla kuljettaja tietää mistä kohtaa peltoa on jo ajettu työkoneen kanssa ja vältetään turhaa päällettäistä ajoa (Grisso ym. 2005). Järjestelmä voidaan varustaa myös automaattiohjauksella, jolloin kuljettajan ei tarvitse huolehtia muusta kuin työkoneen toiminnasta ja päisteessä kääntymisestä seuraavalle käsittelemättömälle ajouralle (Grisso ym. 2005). Automaattiohjauksen ja ajo-opastuksen ansiosta pelloilla tapahtuvaa työtä on saatu tarkemmaksi ja nopeammaksi (Pesonen ym. 2010). Ajo-opastimen ansiosta pystytään välttämään turhaa päällekkäistä ajoa pellolla ja näin ollen pystytään esimerkiksi levittämään pellolle tuotantopanoksia entistä tarkemmin. Näin vältetään esimerkiksi päisteissä kaksinkertainen käsittely alueelle (Pesonen ym. 2010). Riviviljelyssä automaattiohjauksen avulla saadaan aikaiseksi suorat viljelyrivit, joita voidaan hyödyntää myöhemmin kasvukaudella esimerkiksi rivivälien harauksissa (Hermann 2013).

Automaattiohjauksen rinnalla yhtenä tärkeänä täsmäviljelyn keinona on myös satotasojen seuranta (Heacox 1998). Pelloilta paikkakohtaisesti kerättyä satotietoa voidaan hyödyntää pellon kunnon tarkastelussa. Pellosta saadaan selville satotietojen avulla alueita, joissa sato poikkeaa lohkon keskimääräisestä sadosta. Tarkemmilla tutkimuksilla voidaan selvittää mikä ongelmakohdat aiheuttaa ja toteuttaa näillä alueilla mahdollisia korjaustoimenpiteitä. Nykyisin on olemassa menetelmiä, joilla kasvuston kuntoa pystytään seuraamaan jo kasvukauden aikana. Esimerkiksi lennokeilla pystytään ilmakuvaamaan peltolohkoja ja tarkastelemaan kasvustoa ylhäältä käsin, jolloin poikkeamia kasvustossa on helpompi havaita (Näsi ym. 2018). Myös traktoreihin on saatavilla erilaisia mittalaitteita, jotka mittaavat kasvuston kuntoa pellolla ajettaessa esimerkiksi lannoituksen yhteydessä (Singh ym. 2015). Saatujen tietojen avulla voidaan esimerkiksi säätää työkoneen levitysmäärää ajonaikana, tai myöhemmin suunnitella kerätyn tiedon perusteella tarkempia aluekohtaisia lannoit-

tuksia tai kasvinsuojelutoimenpiteitä. Oikeanlaisilla välineillä varustetulla työkoneella pystytään tällöin lannoittamaan haluttuja alueita tarkalla määrällä lannoitetta (Pesonen ym. 2010).

Tällä hetkellä lähes kaikilla traktorivalmistajilla on myynnissä traktorimalleja, jotka on mahdollista varustaa ISOBUS-järjestelmällä. ISOBUS-järjestelmä on traktoreiden ja työkoneiden välisen tiedonsiirron mahdollistava ISO 11783 -standardi (Tuure ja Suomi 2008). Monen muun toiminnon lisäksi tämä väyläratkaisu mahdollistaa esimerkiksi työkoneen levitysmäärän säätämisen traktorin sijainnin perusteella ennalta määrätyn ohjaustiedoston mukaan. Ohjaustiedoston laatimisessa voidaan hyödyntää aiempien kasvukausien satokarttoja käsiteltävältä lohkolta, jolloin työkone saadaan muuttamaan levitysmäärää automaattisesti aiempien satojen perusteella. Tämän ansiosta vältetään lannoittamasta tarpeettomia alueita ja pystytään keskittämään lannoitteiden saatavuus alueille, josta siitä on enemmän hyötyä. Näin on mahdollista säästää lannoitteiden kustannuksissa ja mahdollisesti kasvattaa lopullista satotasoa (Pesonen ym. 2010).

2.1 Sadonmittaus työkoneissa

Nykyisin monet työkoneet on mahdollista varustaa erilaisilla satoa mittaavilla mittalaitteilla. Puumureissa ensimmäiset satoa mittaavat laitteet julkaistiin vuonna 1992 (Ag Leader 2017). Tämä antaa tärkeää tietoa erityisesti leikkuupuumureissa viljapeltojen paikkakohtaisesta sadontuottokyvystä kasvukausittain. Sen lisäksi pystytään reaaliaikaisesti seuraamaan, kuinka paljon satoa pellosta korjataan. Säilörehun tuotannossa paikkakohtaisen sadon määrän tietäminen on yhtä tärkeässä roolissa. Määrän arvioiminen katsomalla paalikasan kokoa tai rehusiilon täyttöastetta antaa melko hyvän käsityksen siitä paljonko satoa on kokonaisuudessaan korjattu. Tämä ei kuitenkaan kerro totuutta eri lohkojen kasvukunnosta ja tarkkaa paikkakohtaista satotasoa. Satotasojen tietäminen auttaa lannoitusten kohdentamisessa niille alueille, joilla satopotentiaali on suurempi, jolloin seuraavasta rehusadosta voidaan saada parempi tuottavuus. Tarkkojen paikkakohtaisten satotasojen avulla tiedetään myös, paljonko rehua on yhteensä kiloina korjattu. Kun tiedetään, montako kiloa rehua pelloilta on korjattu, pystytään suunnittelemaan eläinten ruokintaa tarkemmin ja arvioimaan rehujen riittävyys. Ajosilppureihin on nykyään saatavilla järjestelmiä, jotka mittaavat rehun virtausta reaaliaikaisesti ja mahdollistavat satotasojen seurannan ajon aikana. Tällöin voidaan havaita myös heikot karheen kohdat, joissa nurmi on kasvanut huonommin. Tällaiset järjestelmät ovat saatavilla muun muassa John Deeren (John Deere 2020), New Hollandin (New Holland Agriculture 2017), ja Claasin (Claas 2020) ajosilppureihin. Järjestelmät pystyvät muun muassa mittaamaan satotasoja sekä rehun kosteutta. Tietojen avulla pystytään korjatuilta pelloilta muodostamaan satokartat.

Sadonmittausjärjestelmät ovat yleistymässä myös noukinvaunuissa ja paalaimissa. Noukinvaunuissa pystytään punnitsemaan kuorman paino ja seuraamaan kuorman muodostumista ajon aikana. Esimerkiksi Kronen mallistossa on saatavilla punnitusjärjestelmä tiettyihin noukinvaunumalleihin, jotka pääsevät ± 3 % tarkkuuteen kuorman punnitsemisessa (Krone 2012). Kronen suurkantipaalaimissa paalien paino pystytään mittaamaan paalin kulkeutuessa ulos koneesta paaliramppiin asennettujen sensoreiden avulla. Kronen punnitusjärjestelmällä päästään ± 2 % mittaustarkkuuteen (Krone 2012).

2.2 Sadonmittaus pyöröpaalauksessa

Paalien punnitus pelto-olosuhteissa on haastavaa. Paalaimen tekniikka ei mahdollista kovin helppoa punnitusjärjestelmän asentamista paalaimen. Tutkimuksissa on vaihtelevilla menestyksillä rakennettu erilaisia menetelmiä sadon mittaamiseen. Kroulík ym. (2011) käyttivät tutkimuksissaan paalainta, joka mittasi muuttuvakammioisen paalaimen remmin kiristimen liikettä. Potentiometri mittasi kammion remmeissä tapahtuvaa liikettä ja kalibroinnin avulla saatiin selville paalin massa. Menetelmä oli varsin toimiva, mutta sitä voitiin käyttää vain muuttuvakammioisissa paalaimissa. Loftis ym. (2019) kehittivät mittausjärjestelmän paalaimen takana olevaan ramppiin. Paalaimen kammion auetessa paalin poistamista varten, putoaa paali rampin päälle, joka antaa periksi ja laskee paalin maahan. Anturit oli asennettu mittaamaan ramppiin kohdistuvaa kiihtyvyyttä. Testeissä he pääsivät hyviin tuloksiin, mutta paalaimen asennettuna laite ei kyennyt rekisteröimään paalien massoja. Wild ja Auernhammer (1999) pääsivät tutkimuksessaan tarkimpiin tuloksiin. He käyttivät paalien punnitukseen paalaimen asennettavia venymäliuskoja. He mittasivat venymäliuskoilla paalaimen akselissa tapahtuvaa taipumista ja traktorin vetokoukkuun kohdistuvaa voimaa. He pääsivät staattisissa oloissa alle 1 % virheeseen punnitustuloksessa, ja pelto-oloissa virhe oli ± 10 % sisällä.

Pyöröpaalauksen sadonmittaukseen on nykyään saatavilla kaupallisia versioita ainakin Kronelta ja Agronicilta. Agronicin paalaimessa punnitus perustuu paineen mittaukseen paalilastaimen hydraulikkapiirissä (Mauri Autio, Agronic oy, sähköpostiviesti kirjoittajalle 23.4.2020). Tällä järjestelmällä päästään jopa ± 2 % tarkkuuteen tasaisilla pelloilla. Punnitusjärjestelmä on Agronicin tapauksessa saatavilla vain kombipaalaimen, jossa käärijä ja paalain ovat samassa työkoneessa.

3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia pyöröpaalauksen reaaliaikaista sadonmittausta korjuun aikana. Reaaliaikainen sadonmittaus mahdollistaa tarkan tiedon keräämisen pellolta sadonkorjuun aikana ja antaa tärkeää tietoa pellon satotasoista ja korjatun rehun määrästä. Paalaukseen sovellettua sadon tarkkaa mittaussuunnitelmaa ei tutkimusaineiston keruuhetkellä ollut yleisesti saatavilla. Työssä keskityttiin tutkimaan venymäliuskojen käytön mahdollisuutta paalin reaaliaikaiseen punnitukseen. Työssä ei otettu huomioon muita rehusadon riittävyyteen vaikuttavia rehun laatutekijöitä kuten sulavuutta tai kuiva-ainepitoisuuksia, vaan keskityttiin ainoastaan mittaamaan pyöröpaalien painoa paalauksen aikana. Samalla tutkittiin paalin muodostumisen vaikutusta traktorin tehon tarpeeseen mittaamalla nivelakselin vääntömomenttia ja pyörimisnopeutta.

4 AINEISTO JA MENETELMÄT

Tutkimuksessa päädyttiin käyttämään venymäliuska-antureita paalin painon punnitsemiseen. Venymäliuskoihin päädyttiin niiden asennuksen helppouden takia, sillä paalaimen ei tarvitse tehdä rakenteellisia muutoksia venymäliuskoja asennettaessa. Tutkimuksessa selvitetään lisäksi, miltä matkalta paalit on kerätty ja myös minkälaista tehontarvetta traktorilta vaaditaan paalin muodostumisen aikana. Mittalaitteilla pystyttiin mittamaan traktorin kulkeman matkan, nivelakselin pyörimisnopeuden, nivelakselin vääntömomentin sekä paalin painon. Lisäksi oli vielä anturi, joka tunnistaa paalikammion aukeamisen paalin tiputusta varten. Mittauksia varten traktoriin asennettiin kaikki tarvittavat mittalaitteet ja kiinnitettiin anturit sopiville paikoille. Mittaustulokset tallennettiin reaaliajassa kannettavalla tietokoneella.

Tutkimukseen liittyvät mittaukset suoritettiin kesällä 2015 Helsingin yliopiston Viikin opetus- ja tutkimustilalla. Paalauksia tehtiin pääosin nurmisäilörehulla, mutta muutama olkipaalaus mitattiin myös syksyllä. Tutkimuksessa käytettiin Viikin opetus- ja tutkimustilan työkoneita. Paalaimena toimi kiinteäkammioinen Welger PR 235 Profi -pyöröpaalain. Paalaamiseen käytetty traktori oli merkiltään ja malliltaan Valmet 6600. Nurmi niitettiin Kronen EasyCut 3210 CV hinattavalla niitomurskaimella. Niittokoneen työleveys oli 3,14 metriä. Heinää ei karhotettu ennen paalausta.

4.1 Mittalaitteet

Paalin muodostumisen tutkimisessa käytettiin useita erilaisia mittalaitteita. Mittalaitteiden avulla selvitettiin paalin massaa, traktorin tehontarvetta ja paalaimen pellolla kulkemaa matkaa. Mittausten tavoitteena oli saada mitattua muodostuvan paalin massa paalauksen aikana. Mittaustapahtumaa kehitettiin paalausten edetessä paremman mittaustarkkuuden aikaansaamiseksi.

4.1.1 Venymäliuskat

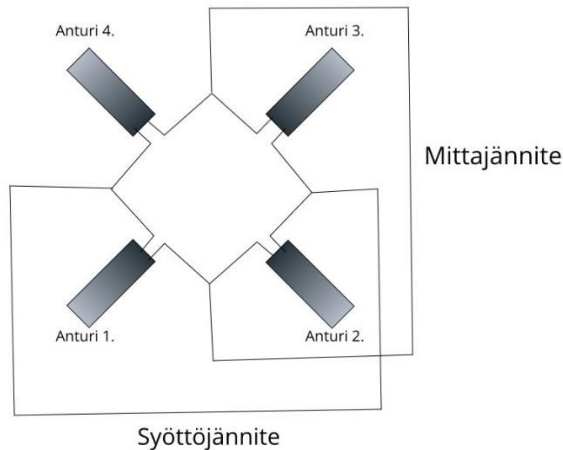
Koska halusimme selvittää paalin massan kiloina paalauksen aikana, päädyimme käyttämään painon mittaamiseen venymäliuskoja. Venymäliuskat ovat käytännössä 120 ohmin vastuksia, joiden resistanssit muuttuvat, kun venymäliuska-antureita venyttää tai puristaa kasaan (Koivuviita 1997). Venymäliuskat kiinnitetään metalliin liimaamalla ja ne mittaavat metallin venymää. Kun paalaimen kammiossa rehumassa kasvaa, kasvaa myös paalaimen renkaille ja akselille kohdistuva massa. Kun

massa kasvaa, paalaimen akseli kannattelee suurempaa massaa ja metalli taipuu. Taipumista ei välttämättä silmämääräisesti huomaa, mutta venymäliuskat rekisteröivät taipumisen. Venymäliuskoina käytettiin HBM:n (Hottinger Baldwin Messtechnik) valmistamia LY1 standardeja venymäliuskoja. Liuskoja asennettiin paalaimen akselille siten, että molemmille puolille konetta tuli neljä kappaletta antureita. Kummallakin puolella paalainta anturit oli sijoitettu siten, että kaksi anturia paalaimen akselin yläpuolella ja kaksi alapuolella. Anturit asennettiin akselille puhtaalle metallipinnalle liimaamalla (Kuva 1.). Akselista hiottiin maalipinta pois kokonaan kulmahiomakoneella. Liimaus pyrittiin tekemään huolellisesti ja tasaisesti, jotta mittaustulos olisi mahdollisimman tarkka. Pienikin ilmakupla tai epätasaisuus anturin ja metallin välissä aiheuttaa vääristymää mittaustuloksissa. Metallipinta ja anturit suojattiin silikonilla, jottei metalli ruostuisi kesän mittausten aikana eivätkä anturit vahingoittuisi. Johtojen paikallaan pysyminen varmistettiin ilmastointiteipillä ja nippusiteillä.



Kuva 1. Paalaimen akselin yläpuolelle asennetut kaksi kappaletta venymäliuskoja puhtaalla metallipinnalla. Kaksi anturia asennettiin vierekkäin ja toiset kaksi anturia asennettiin akselin alapuolelle samaan kohtaan. Antureilta lähteviin johtimiin juotettiin johdot mittausten keräämistä varten.

Kytkenässä käytettiin täyttä Wheatstonen siltaa (Kuva 2). Täydessä Wheatstonen kytkennässä käytetään neljää anturia. Täyden Wheatstonen kytkennän avulla saadaan kompensoitua pois muun muassa lämpötilanvaihtelusta johtuvat virheet ja saadaan tarkempi tulos akselin taipumisesta (Hoffman 1986, Koivuviita 1997).



Kuva 2. Täysi Wheatstonen silta. Kun syöttöjännitteeseen syötetään tunnettua jännitettä, voidaan venymäliuskan venyminen mitata ulostulevana jännitteenä eli mittajännitteenä. Jännitteiden ero kertoo venymisen suunnan ja suuruuden. Muokattu lähteestä (Hoffman 1986).

Kun antureihin syötetään tunnettu jännite, voidaan akselin taipuma, eli järjestelmään kohdistuva voima mitata. Mittaus perustuu syöttöjännitteen ja mittajännitteen väliseen jännite-eroon. Jännite-ero mitataan millivolteina ja kalibroimalla arvot voidaan laskea akselille kohdistuva massa. Neljä anturia sijoitettiin siten, että anturit 1 ja 3 olivat akselin alapuolella ja anturit 2 ja 4 akselin yläpuolella samassa kohdassa.

4.1.2 Venymäliuskojen mittaaminen

Venymäliuskojen arvojen mittaukseen käytettiin kahta eri tapaa. Ensimmäinen tapa oli kytkeä anturit Ahlbronin Almemo 2690 dataloggeriin. Kytkeminen oli helppoa ja dataloggeriin sai kytkettyä molemmat puolet antureista omiin kanaviinsa, jolloin tulokset tallentuivat omiin tiedostoihinsa. Tiedostot sai tallennettua loggerin omaan muistiin, josta ne sai siirrettyä tietokoneelle jatkokäsittelyä varten. Almemon mittaustaajuus oli yksi hertsi (Hz), joka osoittautui liian pieneksi. Liikkuvan pyöröpaalaimen ja paalaimen kammiossa pyörivän paalin aiheuttama tärinä aiheutti liian paljon

häiriötä mittaustuloksiin. Kohinan keskeltä oli vaikea erottaa koneen pomppimisesta aiheutuvaa massapiikkiä ja paalin painoa toisistaan. Tämän vuoksi hylkäsimme tämän dataloggerin ensimmäisen rehunteon jälkeen.

Myöhemmissä mittauksissa siirryimme käyttämään Mantracount:in valmistamaa DSCUSB-laitetta, joka sisältää sekä mittavahvistimen että AD-muuntimen. Laite kykenee täten suoraan lukemaan venymäliuskoista tehtyä piiriä tietokoneen avulla. Laitteita tarvittiin kaksi kappaletta, jotta saatiin paalaimen molemmilla puolilla olevien antureiden tiedot tallennettua. DSCUSB-laitteessa venymäliuskoja varten oli DB-9 liitin, johon kytkettiin kaikki venymäliuskoilta tulevat johdot kiinni. DSCUSB-laitetta ohjataan USB-yhteyden kautta tietokoneella, ja käyttöä varten tarvittut ajurit ladattiin valmistajan verkkosivuilta. Molempien laitteiden mittausta ohjaamaan ja mittausdataa keräämään laadittiin mittausohjelma tietokoneelle (liite 2). DSCUSB-laitteiden avulla mittaustaajuus saatiin nostettua 80 hertsiin. Tämä myös helpotti datan keräämistä usealta mittalaitteelta, kun kaikki mittalaitteet sai kytkettyä samaan tietokoneeseen kiinni ja tallennettua mittausdatat tietokoneen muistiin.

4.1.3 Paikannus

Paalaimen kertyvän massan lisäksi tarvittiin tieto traktorin ja paalaimen sijainnista pellolla. Tähän tarkoitukseen käytimme GPS (Global Position System) vastaanotinta (Garmin GPS 18 PC). Vastaanotin oli pieni ja helppokäyttöinen. Käyttämässämme mallissa oli 9-napainen DB-9-liitin RS-232 kommunikointia varten, ja tupakansytytinsovitin virransyöttöä varten. Vastaanotin saatiin asennettua traktorin katolle anturin pohjassa olevan magneettijalustan avulla. Johdotus vedettiin traktorin katolta sivua pitkin alas ja oven välistä sisälle hyttiin. Laitteen sisäänrakennettu mittaustaajuus oli 1 Hz. Vastaanotin kytkettiin tietokoneeseen RS-232-USB adapteria käyttäen, sillä käytetyssä tietokoneessa ei ollut sarjaporttiliitäntää. Vastaanotin mittaa sekunnin välein sijaintia käyttäen hyväkseen useita satelliitteja ja tarkkuus on WAAS-korjattuna (wide area augmentation system) 95 % ajasta alle 3 metriä. Vastaanottimelta pystytään saamaan monia erilaisia mittausdatoja sijainnin lisäksi, kuten ajonopeus-, kaltevuus- ja korkeustietoja. Tutkimuksen kannalta oleellista oli selvittää työkooneen liikkeitä ja ajankohta, jolloin pellolla oli liikuttu. Paikkatiedon avulla pystyttiin tutkimaan miltä matkalta paaliin tarvittava rehumäärä oli kerätty. Käytimme laitteessa useista erilaisista valmiiksi määritellyistä parametreista Recommended Minimum Specific GPS/TRANSIT (RMC) dataa hyödyksi mittauksissa. Tuloksista saatiin selville muun muassa kellonaika, päivämäärä, pituus- ja leveysasteet sekä ajonopeus mittaushetkellä.

4.1.4 Vääntömomentti ja pyörimisnopeus

Luonnonvarakeskukselta Vakolan toimipisteeltä saatiin lainaan traktorin ja työkoneneen väliin kytkettävä HBM:n valmistama vääntöanturi T30FN. Tällä laitteella pystytään mittaamaan traktorin voiman ulosottoon kytkettynä nivelakselin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia. Laite asennettiin telineellä kiinni traktorin voiman ulosottoon ja pyöröpaalaimen voimaa siirtävän nivelakselin väliin. Traktorin oma nivelakselin suojusta täytyi irrottaa asennuksen takia ja tilalle rakennettiin oma suoja suojaamaan käyttäjää pyörivältä nivelakselilta.

Mittauksia varten anturiin kytkettiin kaksi johtoa, jotka kytkettiin kiinni vahvistimeen. Vahvistimen avulla saatiin valittua mittausherkkyyys, joka määritteli anturin mittaustaajuuden sekä suurimman mitattavissa olevan vääntömomentin ja pyörimisnopeuden. Vahvistin kytkettiin tietokoneeseen AD-muuntimen avulla. AD-muuntimen valmistaja oli LabJack ja käytetty malli U3-HV.

Vahvistimesta oli valittavissa neljä erilaista mittaustaajuutta. Mittaustaajuuden muuttaminen vaikutti vahvistimen ulostulevaan jännitteeseen. Koska LabJack pystyi mittaamaan jännitteitä nollan ja 10 voltin väliltä, ei jokaisella taajuudella ollut mahdollisuutta mitata kovin suuria vääntölukemia. Kuten taulukosta 1 voidaan huomata, on mittaustaajuuden valinnalla vaikutusta mitattuihin arvoihin. Aluksi käytössä oli 1 kHz:n mittaustaajuus, mutta paalausten aikana selvisi että 400 Nm maksimivääntö ei riitä kaikille paaleille mittaustulosten saamiseksi. Ongelmaksi muodostui lähinnä olkipaalien paalaaminen, jolloin maksimivääntöä ei pystytty mittaamaan. Tämän vuoksi siirryimme jatkossa käyttämään 2,5 kHz:n mittaustaajuutta.

Taulukko 1. Vääntömomentin eri mittaustaajuuksien vaikutus maksimiväännön arvoon. Minimiväännön kohdalla ulostuleva jännite on 0 voltia ja maksimiväännössä ulostulo on 10 voltia.

Mittaustaajuus (kHz)	Minimivääntö (Nm) (0 V)	Maksimivääntö (Nm) (10 V)
0	0	200
1	0	400
2,5	0	1000
5	0	2000

4.1.5 Paalaimen kammion avautumisen tunnistus

Venymäliuskojen mittaustaajuuden ollessa 80 hertsiä on kerätyn datan määrä suuri ja yhden paalin erottaminen koko peltoa koskevasta datasta vaikeaa. Siksi haluttiin varmistaa, että tiedetään koska

paali on valmistunut. Traktorin hyttiin asennettiin painonappi, josta koneen kuljettaja voi painaa merkin tietokoneelle paalin valmistumisesta. Tietokoneelle tallentui aikaleimalla merkki silloin, kun kammio oli avattu paalin pudotusta varten. Painonappi oli kytketty tietokoneeseen LabJackin avulla. Ensimmäisessä rehunkorjuussa kerätystä mittausdatasta huomasimme kuitenkin, että koneen kuljettaja ei välttämättä muistanut painaa nappia joka kerta, kun uusi paali valmistui. Paalin valmistumisen voi huomata tarkastelemalla mittausdataa, mutta painonapin avulla yhden paalin etsiminen aineistosta on helpompaa ja nopeampaa. Tällöin saadaan varmasti selville, milloin paali on valmistunut. Seuraavaa rehunkorjuuta varten paransimme paalin tunnistusta siten, että paalaimen kammion avautumista valvoi induktiivinen läheisyysanturi. Läheisyysanturin mittausdata tallennettiin LabJackin avulla. Kun kammio avautui ja kammion luukku oli täysin auki tullen tarpeeksi lähelle anturia, rekisteröi anturi tiedon kammion avautumisesta. Näin saatiin parempi varmuus sille, että mittausdataan jäi aikaleima jokaisen paalikammion aukaisun kohdalle ja yhden paalin datan löytäminen koko aineistosta helpottui huomattavasti.

4.1.6 Puntari paalien punnitusta varten

Paalien mittalaitteilla punnittujen massojen varmistamiseksi punnittiin osassa mittauksia paalit erillisellä puntarilla. Näin pystyttiin vertailemaan mittalaitteilla mitattuja massoja puntarilla punnittuihin massoihin. Punnitusta varten rakennettiin avolava-auton lavalle kolmipistevaakalaite, jolla oli mahdollista punnita paalit. Puntarissa oli kolme sensoria, joiden päälle oli rakennettu kehikko punnitusta varten. Puntarin toiminta varmistettiin samoilla traktorin keulapainoilla, joilla kalibroinnit on suoritettu. Vaa'assa oli näyttö punnitustulosten tarkastelua varten, ja virtaa laitteisto sai auton akusta. Vaaka punnitsi paalit 100 gramman tarkkuudella.

4.2 Mittalaitteiden rakentaminen ja asentaminen

Mittalaitteiden sijoittaminen traktoriin vaati paljon suunnittelua ja sovittelua. Virransyöttö tietokoneelle tehtiin vaihtosuuntaajalla (invertteri), joka muuntaa traktorin akusta saatavan tasajännitteen tietokoneen laturille sopivaksi vaihtojännitteeksi. Invertteri oli kytketty suoraan traktorin akkuun ja sulake kytkennän välissä varmisti, etteivät laitteet rikkoudu mahdollisista virtapiikeistä. U3-HV kytketyt mittalaitteet ja venymäliuskojen DSCUSB laitteet saivat virtaa suoraan tietokoneen USB-portista. GPS-vastaanotin ja vääntömomentin muuntaja kytkettiin traktorin 12 voltin tupakansytytinpaikkaan.

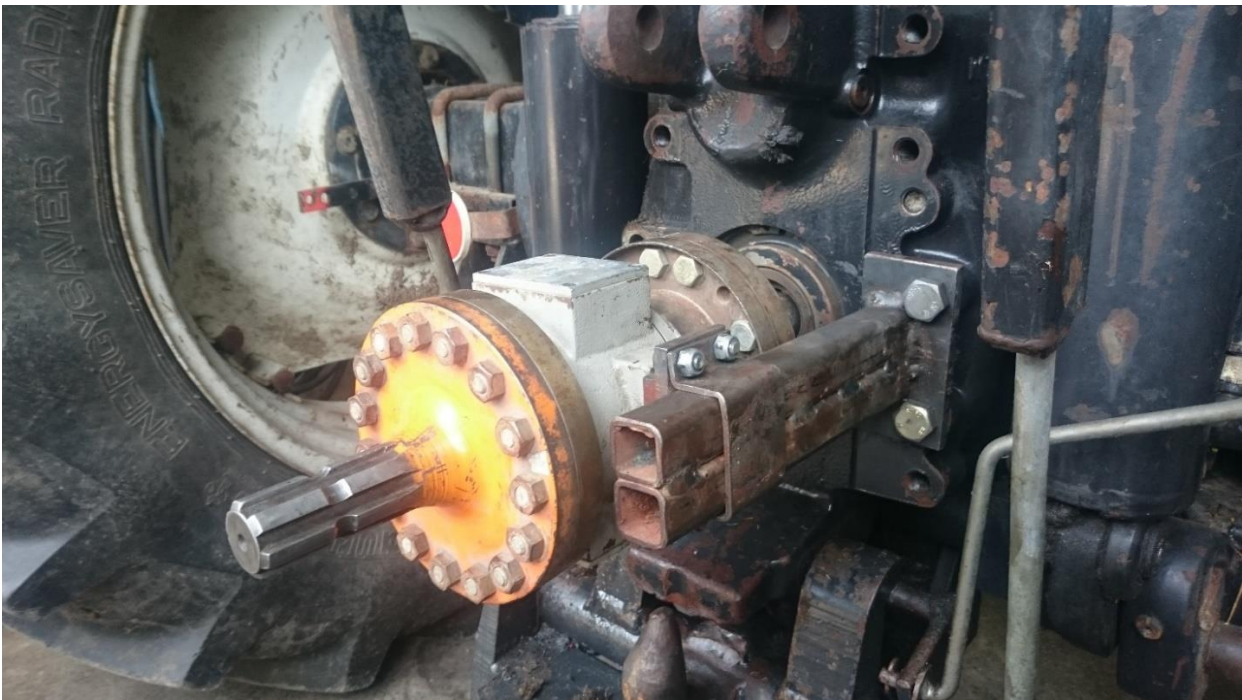
Traktorin hytissä oli rajattu määrä tilaa, ja suuren osan tilasta vei vääntöanturin vahvistin (kuva 3). Kaikki laitteet piti saada tiukasti paikalleen, ettei mikään pääse liikkumaan traktorilla ajettaessa. Kuplamuovi toimi ylimääräisenä pehmusteena tietokoneelle.



Kuva 3. Mittauksia hallinnoivan tietokoneen ja vääntöanturin vahvistimen sijoittuminen traktorin hyttiin kuljettajan penkin taakse. Kuplamuovi suojasi tietokonetta kolhuilta ja tietokone oli sidottuna paikoilleen liinalla.

Venymäliuskojen kunnollinen asentaminen osoittautui haastavaksi. Antureiden asentaminen oli aikaa vievää ja johdotusten kytkeminen tuli tehdä huolella. Paalaimen ahdas rakenne hankaloitti venymäliuskojen asentamista. Renkaan ja paalaimen välissä oli hyvin vähän tilaa työskennellä. Asennuksen haastavuuden takia ensimmäistä rehuntekkoa varten laitteiden testaamiselle ei jäänyt riittävästi aikaa. Testaamista jatkettiin ensimmäisen rehusadon jälkeen. Ensimmäisessä testiversiossa johdot antureilta traktorin hyttiin toteutettiin normaalilla kaksijohtimisella sähköjohdolla. Kerättyä mittausdataa tarkastellessa epäilimme kuitenkin jonkinlaista häiriötä tulevan mittalaitteisiin. Data oli sekavaa ja halusimme varmistua siitä, että johdotus ei häirinnyt mittaustuloksia. Antureiden kanssa samassa nipussa kulki paalaimen sähköjohtoja, jotka saattoivat aiheuttaa häiriötä. Tulosten parantamiseksi vaihdoimme venymäliuskoilta traktorin hyttiin kulkevan johdon häiriösuojattuun kaapeliin.

Kammion avautumista mittaavalle anturille rakennettiin teline paalaimen yläpuolelle anturin pitämiseksi paikallaan. Kaikki johdotukset eri antureilta saatiin kulkemaan paalaimesta traktorin hyttiin hydraulikkaletkujen kanssa samassa nipussa. Näin välttyttiin vaaralta, että johdot takertuisivat renkaisiin tai nivelakseliin. Vääntömomenttianturin suuren koon takia (kuva 4) nivelakseli ei enää mahtunut traktorin ja paalaimen väliin, joten nivelakselia jouduttiin lyhentämään. Traktorin oma nivelakselin suojuus ei enää mahtunut anturin kanssa paikoilleen, joten rakensimme pellistä uuden suojan anturin ympärille.



Kuva 4. Vääntömomenttianturin kiinnitys. Anturi pysyi traktorissa tukiraudan avulla, ja paalaimen nivelakseli kytkettiin anturin tappiin. Vaalea osa laitteen keskellä oli varsinainen mittalaite, ja siihen kytkettiin kaksi johtoa vahvistimelle traktorin hyttiin.

4.3 Tiedonkeruu

Tiedonkeruussa käytettiin itse kirjoitettua ohjelmaa C#-ohjelmointikielellä (liite 2). Ohjelmana käytettiin Microsoft Visual Basic -ohjelmaa. Kaikki data saatiin kerättyä yhdellä tietokoneella ja yhdellä ohjelmalla.

Ohjelma tallensi mittausdatan kolmeen erilliseen tiedostoon. Eri antureiden mittaustaajuuudet vaihtelivat, ja datan analysoimisen kannalta oli selkeämpää eriyttää eri mittaustaajuuudet omiin tiedostoihinsa. GPS-vastaanottimen tiedot tallennettiin yhteen tiedostoon. Vääntömomentti, kierrosnopeus

ja paalikammion aukeaminen tallennettiin toiseen tiedostoon. Kolmanteen tiedostoon tallennettiin venymäliuskojen arvot. Kaikkiin tiedostoihin tallennettiin kunkin mittaushetken kellonaika ja päivämäärä. Lisäksi vääntömomenttia ja paalin painoa kuvaaviin tiedostoihin lisättiin myös millisekunteina tiedot mittaushetkestä. Aikaleiman tallentaminen jokaiseen tiedostoon oli tärkeää datan analysointia varten. Koska eri tiedostoihin kirjoitettiin dataa eri mittaustaajuuksilla, pystyttiin datan käsittelyvaiheessa yhdistämään samaan hetkeen kuuluvat mittaukset.

GPS-vastaanottimen mittaustaajuus oli 1 mittauss/sekunti (1 Hz). Tämä oli kaikista mittauksista hitain, mutta koska traktorin liike pellolla ei ole kovin nopeaa (alle 13 km/h), riitti taajuus tähän tarkoitukseen hyvin. Vääntömomentin ja pyörimisnopeuden mittaustaajuus oli asetettu mittaamaan 25 millisekunnin välein (40 Hz), mutta todellinen mittaustaajuus oli noin 35 millisekunnin välein (29 Hz). Venymäliuskoja haluttiin mitata mahdollisimman tiheästi ja mittaustaajuus oli noin 80 Hz. Mahdollisimman tiheä mittaustaajuus vähensi signaalin vääristymistä ja saatiin selkeämpi lopputulos.

4.4 Mittalaitteiden kalibrointi

Mittalaitteet tulee kalibroida, jotta laitteiden antamat lukemat voidaan muuttaa hyödyllisiksi lukuarvoiksi. Mittalaitteiden asennukseen ja testaukseen kului niin paljon aikaa, että ennen ensimmäistä rehunkorjuuta ei mittalaitteita ehditty kalibroida. Rehuntekoa ei voitu tutkimuksen takia viivästyttää, sillä sääolosuhteet ja nurmenkasvu vaikuttivat korjuun ajankohtaan. Mittalaitteiden kalibrointi suoritettiin ensimmäisen rehunkorjuun jälkeen.

4.4.1 Vääntömomentin ja pyörimisnopeuden kalibrointi

Vääntömittarin kalibrointia varten mittalaite kiinnitettiin testipenkkiin. Tämän jälkeen toiseen päähän asennettiin puolen metrin varsi, johon asetettiin eri suuruisia painoja (kuva 5). Eri painoilla mitattujen tulosten avulla pystyttiin laskemaan vääntömomentin arvot (taulukko 2) kaavalla 1.

(1)

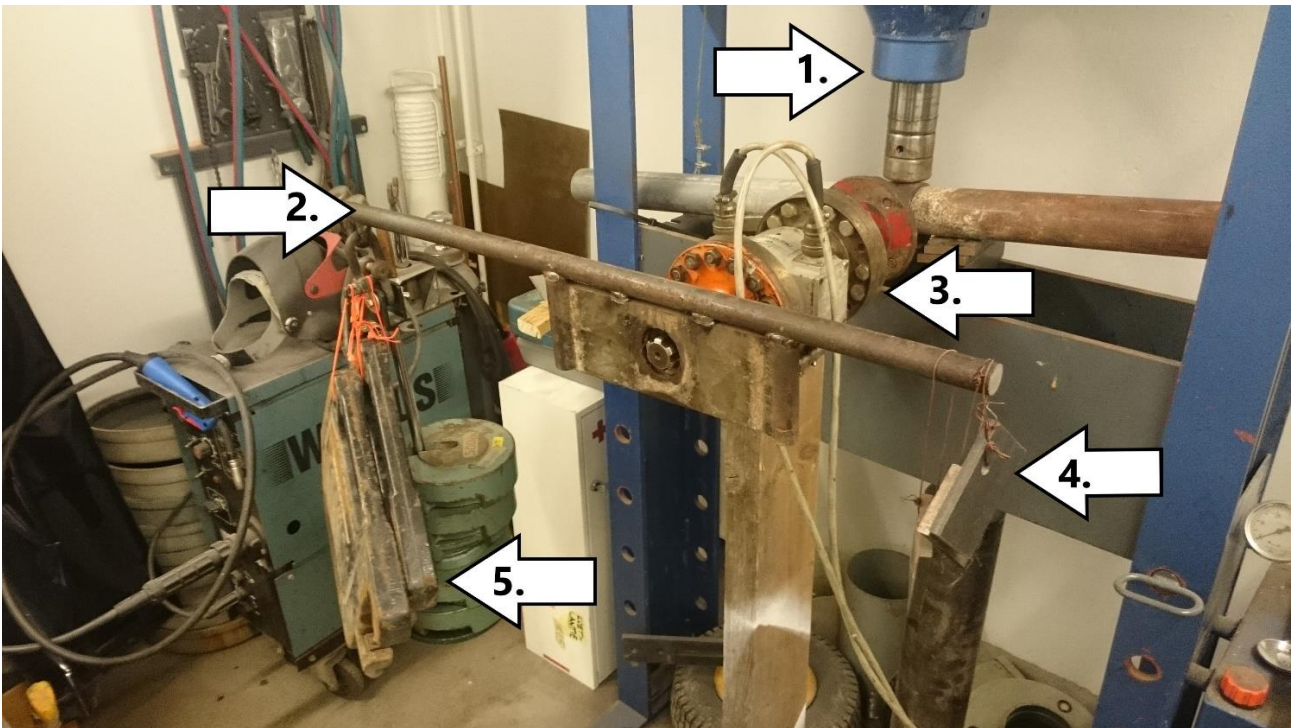
$$\text{Kalibrointiarvo} = \frac{0.5 * g * m}{U}$$

jossa

g = normaali putoamiskiihtyvyys $9,81 \text{ m/s}^2$

m = massa, kg

U = jännite, V



Kuva 5. Vääntömomenttianturi (3.) kiinnitettynä hydrauliprssiin (1.). Puolen metrin varren (2.) päässä traktorin keulapainoja (5.) painona. Painot ovat 50 sentin päässä vääntömomenttianturin akselin keskipisteestä. Vastapainot (4.) tasapainottavat anturin näyttämään nollaa ilman keulapainoja.

Taulukko 2. Vääntömomentin kalibroinnin tulokset. Mittarin lukemissa on käytetty 100 mittauksen keskiarvoa. Tulokset on kalibroitu 2,5 kHz mittataajuudelle.

Massa	Vääntö	50cm varren vääntö	Jännitelukema/50cm	Vääntömomentti/jännite
kg	Nm	Nm/50cm	V	Nm/V
0	0	0	0,0	0
49,4	484,6	242,3	2,4	100,4
99,7	978,3	489,1	4,9	99,4

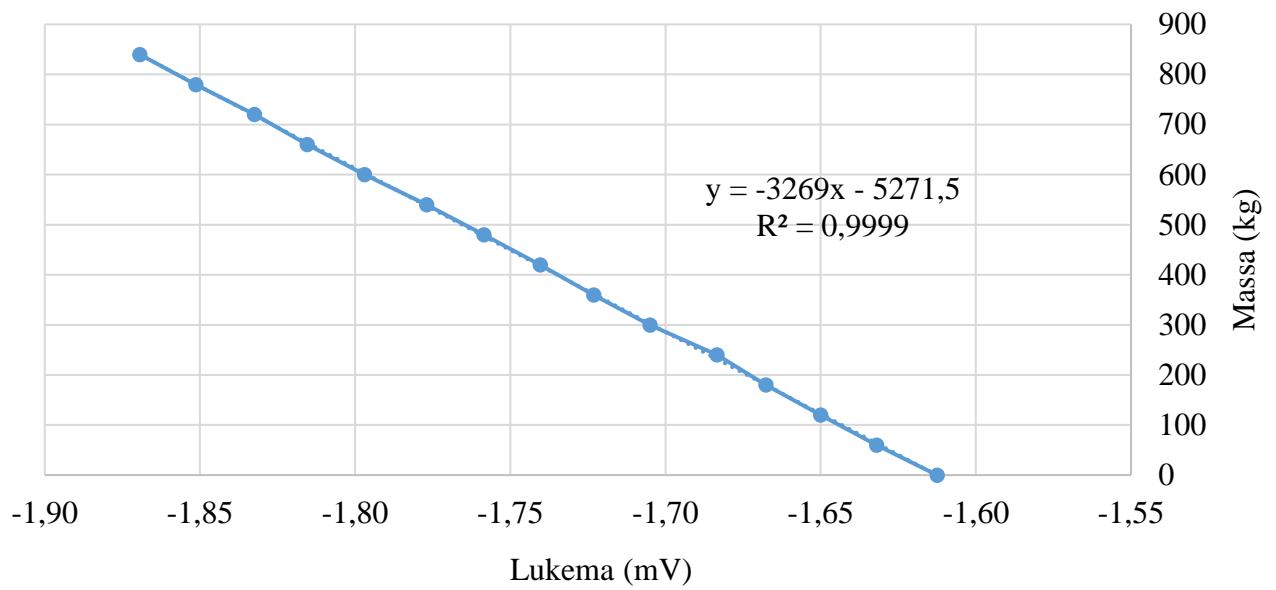
Pyörimisnopeus kalibroitiin käyttämällä käsikäyttöistä kierrosnopeusmittaria. Nivelakselia pyöritettiin eri traktorin moottorin kierrosnopeusalueilla ja taulukoitiin tulokset (taulukko 3). Mittarina käytettiin Lutron electronicsin DT-2238 photo/contact tachometer:iä.

Taulukko 3. Pyörimisnopeuden kalibroinnin tulokset.

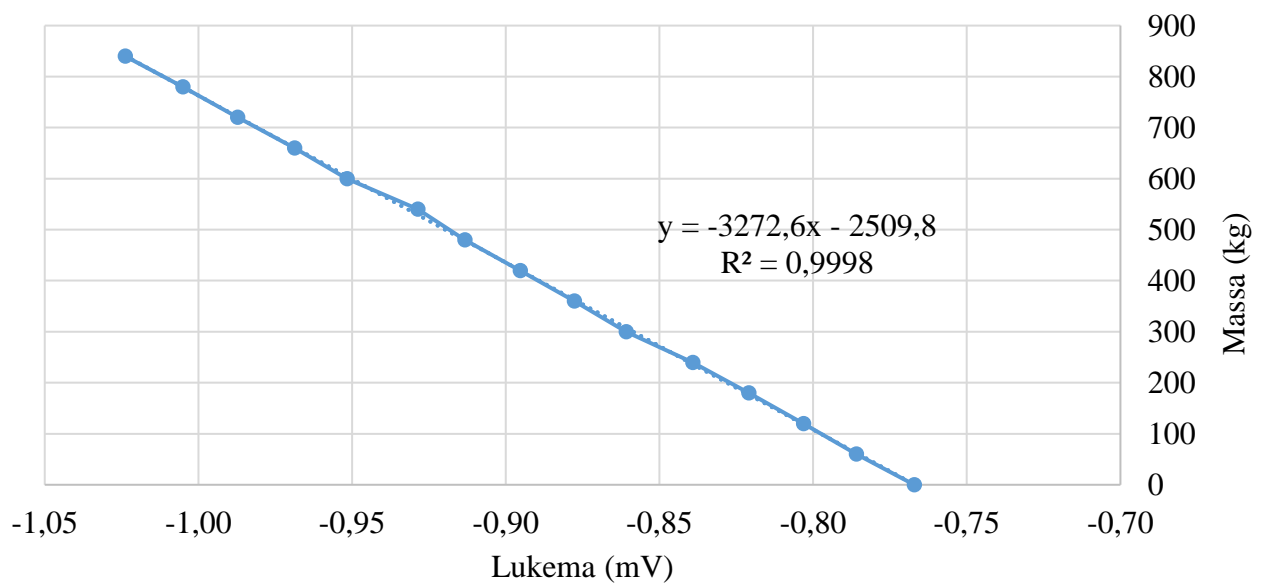
Traktorin moottorin kierrosnopeus	Voimanoton pyörimisnopeus	Mitattu jännitelukeman keskiarvo (100 kpl)	Kierrosnopeus/jännite
RPM	RPM	V	RPM/V
750 (tyhjäkäynti)	190	1,9	99,9
1200	300	3,0	100,0
1900	475	4,8	99,9
2150	535	5,4	99,6
2400	586	6,0	97,2

4.4.2 Venymäliuskojen kalibrointi

Venymäliuskat kalibroitiin asettamalla paalaimen kammioon traktorin keulapainoja ja mittaamalla saadut tulokset. Mittaukset tehtiin 60 kg välein 840 kg asti (liite 1). Kuten kuvien 6 ja 7 akseleiden arvoista huomataan, oli antureiden välillä eroa. Kuvaajien arvot eivät ala samasta pisteestä, eli anturit antavat keskenään erilaisia mittaustuloksia. Tämä voi johtua monesta tekijästä. Todennäköisesti ero johtuu antureiden asennuksesta. Akselin ylä- ja alapuolilla olevat anturit eivät välttämättä ole täysin samoissa kohdissa toisiinsa nähden, jolloin eroavaisuutta voi syntyä. Myös paalaimen akselin materiaalilla on vaikutusta mittauksen tuloksiin. Paalaimen akseliin käytetty metalli ei välttämättä ole tasalaatuista ja tämä voi osaltaan aiheuttaa erilaista taipumista akselille. Negatiiviset arvot johtuivat todennäköisesti kytkentätavasta ja mittauksen suoritustavasta.



Kuva 6. Oikeanpuoleisen anturin kalibrointi-arvot piirrettynä.



Kuva 7. Vasemmanpuoleisen anturin kalibrointi-arvot piirrettynä.

4.5 Kenttämittaukset

Paalaukset suoritettiin koetilan pelloilla. Paalaintraktoria ajoi koetilan työntekijä. Paalausten alussa tietokoneelta käynnistettiin mittausdatan kerääminen ja dataa kerättiin koko paalauksen ajan. Kuljettajan ei tarvinnut paalausten aikana koskea tietokoneen säätöihin, ainoastaan sulkea mittausohjelma ja tietokone paalausten loputtua.

Mittauksia suoritettiin kesän 2015 aikana monia (taulukko 4). Kaikista paalauskerroista ei ole mitausdataa, sillä monimutkaisen käyttöliittymän takia paalauksen suorittanut henkilökunta ei aina onnistunut laittamaan mittausdataa oikein päälle. Vaikka mittauksia tehtiin useilta pelloilta, ei kaikkia mittausdataa käsitelty datan keräämisen jälkeen. Mittalaitteiden toimintakunnosta ja tarkkuudesta ei ollut varmuutta, joten tarkempaan tarkasteluun ei otettu kuin 12.8. suoritettut mittaukset, joissa mittalaitteilla mitattuja paalien massoja verrattiin puntarilla punnittuihin paalimassoihin.

Taulukko 4. Eri paalauskerrat lueteltuna.

Paalauspäivä	Paalattu materiaali	Huomioitavaa
10.6.	Nurmi	Ensimmäiset peltomittaukset
28.7.	Nurmi	
12.8.	Nurmi	Puntarilla punnitut paalit
10.9.	Olki	
11.9.	Olki	
14.9.	Olki	
15.9.	Olki	
28.9.	Olki	
29.9.	Nurmi	
1.10.	Nurmi	

4.6 Satokartan muodostaminen

Satokartta muodostettiin käyttämällä hyödyksi mittauksissa kerättyjä paikkatietoja ja satotasoja. Kun tiedettiin niittokoneen työleveys, voitiin määrittää alue, jolta rehua on kerätty ja piirtää tietojen avulla kartta. Satokarttojen määrittämiseen käytettiin hyödyksi ArcGIS paikkatieto-ohjelman ArcMAP sovellusta. Sovelluksen avulla pystyttiin digitoimaan jokaiselle paalille kuljettu matka ja matkan pituus. Aineistossa hyödynnettiin GPS-anturin antamia sijaintitietoja reittien määrittämiseen. Jokaiselle paalille piirrettiin aluksi kartalle reitti, joka kuljettiin paalauksen aikana. Niittokoneen

työleveyden ollessa 3,14 metriä saadaan laskettua paalattu pinta-ala. Kun tiedettiin paalin massa, voitiin laskea pinta-alan ja massan avulla satotaso tonnia/hehtaari.

Koska venymäliuskojen antamat mittaustulokset sisälsivät paljon kohinaa, oli vaikea selvittää mittaustuloksista tietyllä ajanjaksolla tapahtuvaa massan muutosta paalaimen kammiossa. Tästä syystä toteutetuissa satokartoissa ei piirretty hetkellistä rehun satotasoa, vaan koko paalin massa jaettiin koko paalaukseen käytetylle matkalle. Tämä satokartta ei ole yhtä tarkka kuin hetkellistä satotasoa hyödyksi käyttävät satokartat, mutta antaa kuitenkin tärkeää tietoa pellon kasvukunnosta

4.7 Mittaustulosten käsittely

Mittalaitteilta saadut tulokset tallentuivat tekstitiedostoiksi. Datan käsittelyssä käytettiin sekä Excel- taulukkolaskentaohjelmaa (Microsoft), että Matlab-laskentaohjelmaa (The MathWorks). Satokartta muodostettiin käyttämällä ArcGIS paikkatieto-ohjelmiston ArcMAP sovellusta (Esri). Ongelmaksi Excelin kanssa muodostui joidenkin peltolohkojen suurten datamäärien käsittely. Exceliin mahtuu 1 048 576 riviä dataa ja osassa mittauksista saattoi olla dataa yli kaksi miljoonaa riviä. Matlab on tällöin parempi vaihtoehto tiedostojen käsittelyyn. Osaa tiedostoista piti muokata ennen datan käsittelyä Matlabilla. Venymäliuskojen mittaustulokset sisältävät desimaalilukuja, ja tiedot tallentuivat käyttäen desimaalierottajana pistettä. Matlab käyttää desimaalierottajaksi pilkkua. Jotta tuloksia osattaisiin tulkita oikein, täytyi pisteet muuttaa pilkuiksi etsi ja korvaa -toiminnolla. Matlabin avulla piirrettiin tutkimuksessa esitetyt kuvaajat. Kalibrointiarvojen avulla voitiin Matlabissa muuttaa mittauksissa saadut lukuarvot ymmärrettäviin muotoihin.

Suuren datamäärän takia oli helpompaa tarkastella yksittäisiä paaleja datan joukosta. Datasta eroteltiin yksittäiset paalit käyttäen kahden peräkkäisen paalaimen kammion aukaisun aikaväliä. Yksittäiset paalit tallennettiin omiksi tiedostoiksi, jotka sisälsivät kaiken yhden paalin mittausdatan. Matlabissa oli tällöin helppo tarkastella eri paaleja muuttamalla vain tarkasteltava tiedosto vastaamaan paalin mittausdatan tallennustiedostoa. Matlabin avulla saatiin piirrettyä ilmakuvan päälle paalattujen paalien reitit ja piirrettyä kuvaajiin mittausdatasta pyörimisnopeus, vääntömomentti ja molempien puolien venymäliuskojen tulokset.

5 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Ensimmäiset peltomittaukset

Mittalaitteiden suunnittelussa ja rakentamisessa kului odotettua enemmän aikaa, ja paalain oli saatava kuntoon ennen ensimmäistä rehuntekkoa. Ensimmäiset paalaukset alkoivat 10.6.2015 koetilan Patteripelto-nimisellä lohkolle. Kyseessä oli iso lohko (n. 11,8 hehtaaria) ja paalaukset suoritettiin kahtena peräkkäisenä päivänä.

Kuvassa 8 on esitetty ensimmäisen mittauspäivän tuloksia. Kuvassa on ilmakuvan päälle piirretty GPS-datan avulla määritetty traktorin kulkema reitti paalausten aikana. Kartan kaksi eri värialueita johtuu eri aikaan kuvattujen ilmakuvien eroista. Ylempi osa kuvasta on heinäkuulta 2015 ja alempi osa huhtikuulta 2014. Kuvassa näkyy, kuinka häiriö mittauksissa on aiheuttanut poikkeamia GPS signaalin tuloksiin. Tämä voi johtua useastakin eri tekijästä. Suurin todennäköisyys on, että GPS on kadottanut signaalin hetkellisesti. Vastanotin on jatkanut sijainnin lukemista, vaikka signaali on ollut heikko. Suurimman osan ajasta sijaintitieto on kuitenkin pysynyt lohkon rajojen sisäpuolella ja silmämääräisesti arvioituna oikealla reitillä.



Kuva 8. 10.6.2015 tehtyjen paalausten GPS-paikkatiedot piirrettynä ilmakuvan (Maanmittauslaitos ortoilmakuva 7/2015 ja 4/2014) päälle.

Toisen paalauspäivän ilmakuvasta (kuva 9) huomataan, että paikkatiedon tallennus onnistui paremmin kuin edellisenä päivänä. Kuvasta huomaamme, että kuljettaja on kahteen kertaan käynyt peltolohkon viereisellä ladolla täydentämässä säilöntäainetta koneeseen.



Kuva 9. 11.6.2015 tehtyjen paalausten GPS-paikkatiedot piirrettynä ilmakuvan (Maanmittauslaitos) päälle.

Mittausten tuloksia havainnollistamiseksi, tarkastelimme koko pellostä kerättyä dataa hieman pienemmässä osassa. Vertailuun otettiin sattumanvaraisesti kolmesta peräkkäisestä paalista koostuva mittausjakso, joiden kohdalla tarkasteltiin pyörimisnopeutta, vääntömomenttia ja venymäliuskojen antamia punnitustuloksia. Kuvaan 10 on merkitty paalatut alueet sinisellä viivalla ja paalien tiputuspaikat punaisiin tähdin. Tarkastelu on tehty 11.6. paalatuista paaleista.

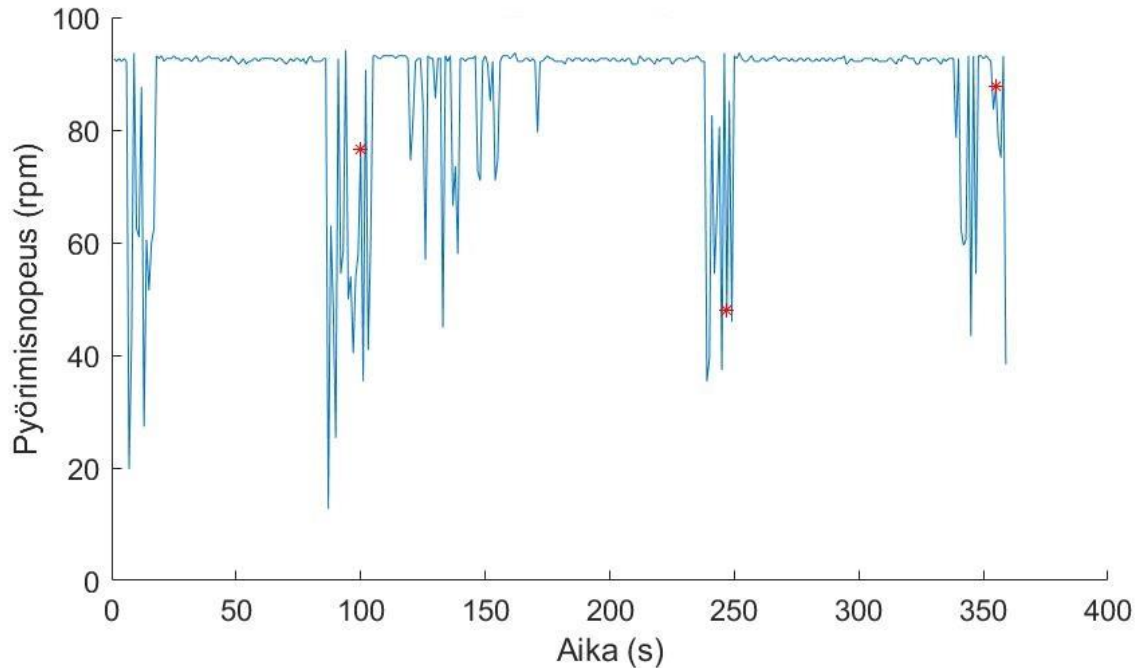


Kuva 10. Ajoreitti kolmen paalin korjuun ajalta pellolla. Punaiset tähdet osoittavat paalien pudotuspaikkoja.

5.1.1 Vääntömomentti ja pyörimisnopeus kolmen paalin tarkastelussa

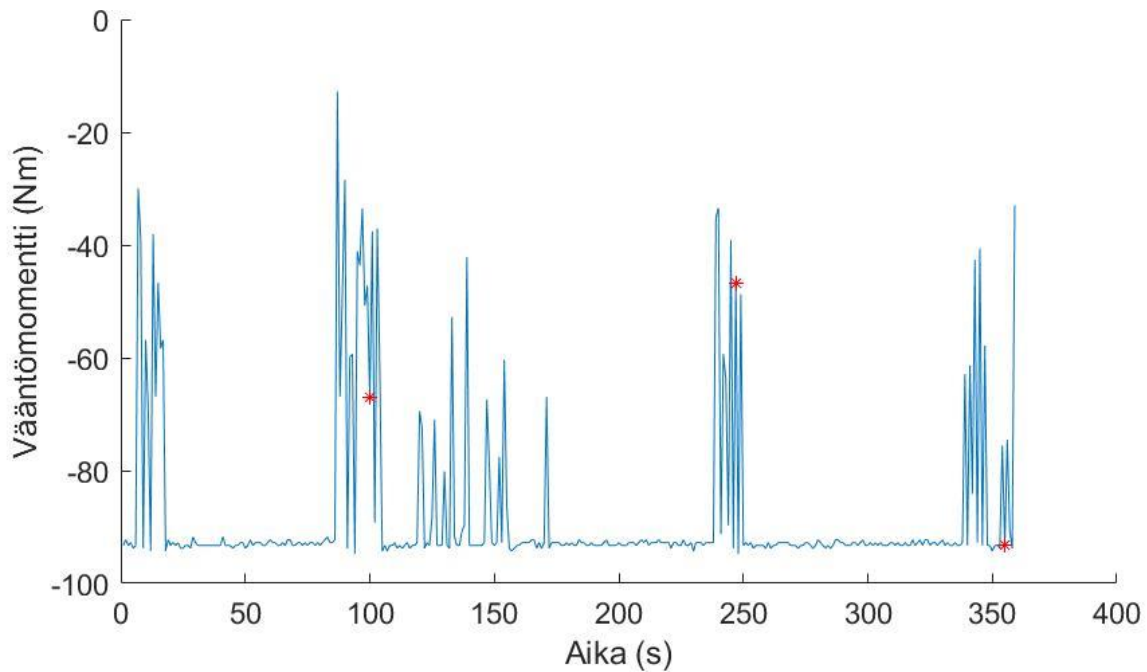
Pyörimisnopeudet ja vääntömomentit saatiin selville saaduista mittaustuloksista. Mittalaitteiden mittaamat jännitearvot muutettiin kalibroinnista saatujen arvojen avulla vääntömomentiksi (Nm) ja pyörimisnopeudeksi (RPM) Matlabin avulla. Koska kalibrointi-arvot saatiin tehtyä vasta paalausten jälkeen, on tähän laskemiseen käytetty näitä myöhemmin kalibroimalla saatuja arvoja.

Kuvasta 11 voidaan huomata, että pyörimisnopeuden tulokset eivät ole todenmukaisia. Normaalisti paalauksessa käytetään paalaimesta riippuen joko standardinmukaisia 540 rpm tai 1000 rpm nivelakselin kierrosnopeuksia. Mittauksista saatujen arvojen mukaan nivelakseli olisi pyörinyt noin 95 kierrosta minuutissa suurimman osan ajasta. Tulokset eivät siten ole luotettavia.



Kuva 11. Pyörimisnopeus kolmen paalin tarkastelulla. Paalien poistumishetki paalaimesta merkitty punaisilla tähdillä.

Vastaava vääristymä voidaan huomata tarkasteltaessa vääntömomenttiin liittyviä tuloksia (kuva 12). Tulokset eivät vaikuta tässäkään tapauksessa oikeilta. Vääntömomentin negatiiviset arvot eivät kuvasta vääntömomentin kasvua, jota oletettavasti tapahtuu paalauksen aikana. Tuloksista voidaan päätellä, että ensimmäisiä paalauksia varten rakennettu mittalaitteisto ei tuottanut tavoitteen mukaisia tuloksia ainakaan pyörimisnopeuden ja vääntömomentin osalta. Mittalaitteiden epävarmuus johti ensimmäisen sadon mittaustulosten hylkäämiseen.

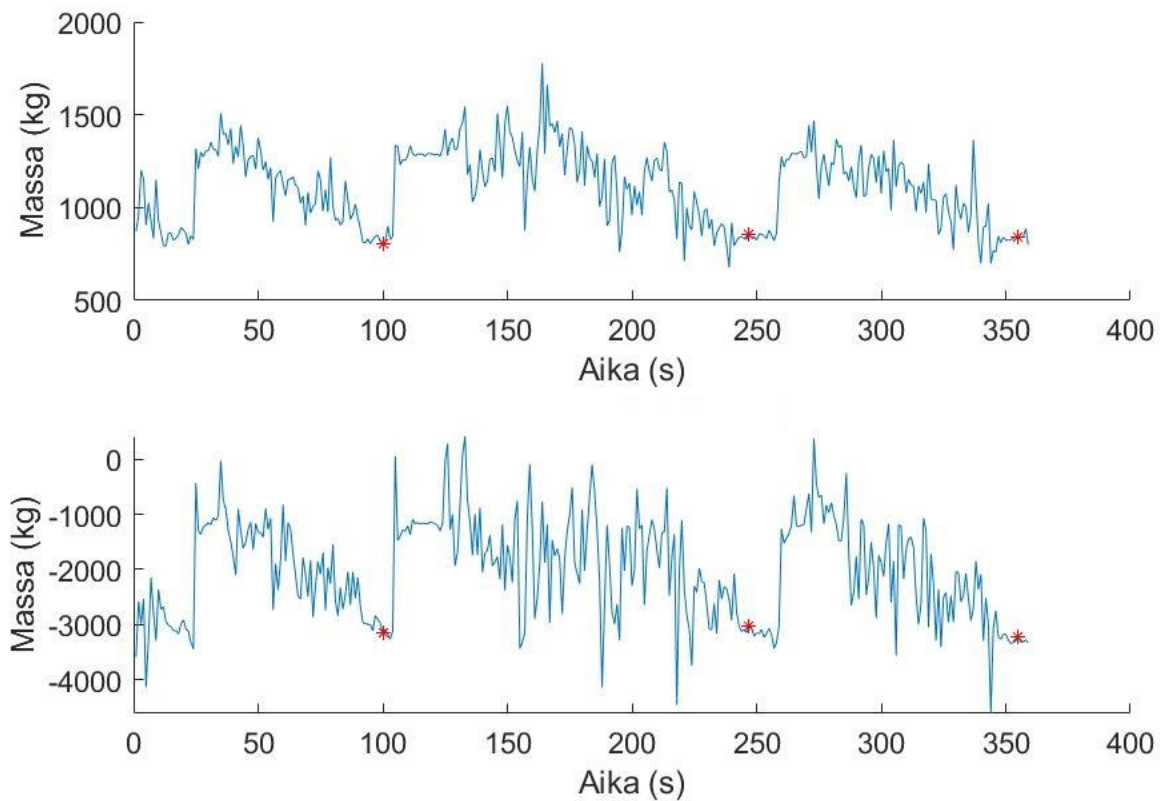


Kuva 12. Vääntömomentti kolmen paalin tarkastelulla. Paalien poistumishetki paalaimesta merkitty punaisilla tähdillä.

Vääntöä ja pyörimisnopeutta mittaavan mittalaitteen häiriön syy jäi epäselväksi. Testausvaiheessa tyhjää paalainta pyöritettäessä ei huomattu mitään erikoista mittaustuloksissa ja laite vaikutti toimivan oikein. Paalausten jälkeen kalibrointia varten vääntömomentti anturi irrotettiin traktorista kalibrointia varten. Anturia takaisin traktoriin kytkettäessä tarkistettiin kytkennät, jotta seuraavat mitaukset onnistuisivat varmemmin. Tämän jälkeen mittauksissa ei havaittu enää vastaavanlaisia ongelmia.

5.1.2 Venymäliuskojen toiminta kolmen paalin tarkastelussa

Venymäliuskojen mittauksissa käytimme Almemon dataloggeria. Kalibrointipunnitukset tehtiin paalauksen jälkeen. Kalibroinnista saatuja arvoja käytettiin määrittämään paalien massat. Kuvassa 13 on esitetty molempien puolien venymäliuskojen tulokset.



Kuva 13. Venymäliuskojen tulokset kolmen paalin tarkastelussa. Paalien poistumishetki paalaimesta merkitty punaisilla tähdillä. Ylemmässä kuvaajassa on vasemman puolen venymäliuskojen tiedot ja alemmassa kuvaajassa oikean puolen tiedot.

Kuvassa 13 on esitetty kolmen eri paalin laskennalliset punnitustulokset. Y-akselien asteikkoja tarkasteltaessa voidaan huomata, etteivät tulokset ole järkeviä. Ensimmäistä paalia tarkasteltaessa vasemman anturin paalin poistumishetken tulisi näyttää nollaa, mutta kuvaajassa se saa arvon noin 800 kiloa. Kuvaajasta havaitaan paalin painon nousseen noin 1500 kiloon. Tämä tarkoittaisi noin 700 kilon paalia, joka vaikuttaa realistiselta. Oikean anturin antamissa lukemissa on enemmän virhettä, ja anturin tulokset vaihtelevat -4000 ja 0 kilon välillä. Oikean anturin lukema paalin poistumishetkellä on noin -3000 kiloa. Vaikka kuvaajista on silmämääräisesti havaittavissa kolmen eri paalin muodostuminen ja arvojen vaihtelu, on 0-kohtien virheestä pääteltävissä, että mittauksissa oli virhettä. Antureiden epäonnistunut asennus oli osasyynä tähän tilanteeseen. Tässäkin kohtaa voidaan todeta ensimmäisen rehusadon mittausten epäonnistuneen.

5.1.3 Mittalaitteiden kehittäminen edelleen

Ensimmäisen paalauksen jälkeen tehtiin jonkin verran muutoksia mittalaitteisiin. Venymäliuskat päädyttiin liimaamaan kokonaan uudestaan paikoilleen. Näin pystyttiin sulkemaan pois huonoista anturien asennuksista johtuneet mittaustulokset. Venymäliuskojen liimauksen helpottamiseksi paalaimesta irrotettiin renkaat, jolloin työskentelytilaa oli enemmän. Samalla vaihdettiin venymäliuskojen mittaukseen käytetty mittalaite. Almemo-dataloggeri pystyi ensimmäisessä paalauksessa mitaamaan arvoja kerran sekunnissa. Paalaimen tärähtely ja liike aiheuttivat jatkuvaa liikettä akselille. Tämän takia kerran sekunnissa mitatuista arvoista oli vaikea sulkea pois värähtelystä ja paalaimen pomppimisesta johtuvia arvoja. Mittaustaajuutta haluttiin nostaa huomattavasti ja päädyttiin käyttämään Mantracount:n DSCUSB-laitetta. Uusilla mittalaitteilla ja antureilla tehtiin tarvittavat kalibroinnit ennen seuraavaa rehuntekoa.

Mittauskertoja oli useita kesän aikana ja melkein jokaisesta paalauskerasta oli jotain mittauksia. Mittauksia kertyi sekä nurmirehun korjuusta, että olkien paalauksesta puintien jälkeen. Alkukesä kului laitteiston asetuksien säätämiseen ja muokkaamiseen. Vasta viimeisiin rehunkorjuisiin saatiin tutkimuslaitteisto toimimaan niin hyvin kuin oli tutkimustyön tavoitteiden kannalta toivottavaa. Laitteiden testaaminen konehallissa oli hankalaa, koska paalainta ei saatu tekemään sitä työtä, johon se oli tarkoitettu. Mittaustarkkuuden parantamisen eteen tehtiin paljon työtä ja muun muassa venymäliuskat asennettiin kerran uudestaan kesän aikana. Päädyimme vaihtamaan myös antureilta lähtevät johdot häiriösuojattuihin kaapeleihin, jotta voitaisiin minimoida ulkopuolisten tekijöiden aiheuttamia häiriöitä.

5.2 Edelleen kehitetyillä mittalaitteilla punnittujen paalien massojen vertailu

Tutkimuksen kannalta oleellista oli tietää, kuinka lähellä 'oikeaa' mitatut paalien massat olivat. Vaikka kalibroinnit ja punnitustulokset näyttävät silmämääräisesti oikealta ja vaikuttavat realistisilta, ei voida olla varmoja tulosten paikkansa pitävyydestä. Koetulosten varmistamiseksi paalit punnittiin yhdellä peltolohkolla, jotta voitiin verrata mittalaitteiden tuloksia vaa'alla punnittuihin. Paalit punnittiin sen jälkeen, kun ne oli ensin kääritty muoviin. Muovin määrä paalissa oli 8 kerrosta, joten painoa muoville kertyi noin 1,5 kiloa. Tätä painoa ei otettu huomioon mittauksissa, sillä muovin paino suhtautettuna koko paalin painoon on vähäinen. Paalit nosteltiin kurottajan avulla vaa'alle ja lukema kirjattiin ylös paperille. Punnitus tehtiin paalien valmistumisjärjestyksessä, jotta pystyttiin vertaamaan rakennetulla mittausjärjestelmällä punnittujen paalien tuloksia vaa'alla punnittuihin

tuloksiin. Liitteessä 3 on taulukoitu kaikkien 97 paalin mittausjärjestelmällä mitatut massat, vaa'alla punnitut massat ja painojen erotukset.

Punnituspaalaus suoritettiin 12.8.2015 korjatulle rehusadolle ”apilapellolta” (noin 6,7 hehtaaria). Nämä tulokset ovat vertailukelpoisia, sillä nyt tiedetään sekä todellinen puntarilla punnittu paalin massa että mittauslaitteiden antama punnitustulos. Kuvassa 14 on esitettyä koko pellon paalauksessa ajettu reitti. Kuvasta voidaan nähdä, että paalin numero 30 kohdalla GPS-anturi on antanut virheellisiä tuloksia hetkellisesti. Tästä johtuen piirrettyssä kuvassa näkyy poikkeamaa. Kuvan vasempaan laitaan lähtevä ajojälki johtuu ruokatunnista, jonka aikana traktori oli parkissa koetilalla.



Kuva 14. ”Apilapellon” paalaus kokonaisuudessaan piirrettynä ilmakuvan (Maanmittauslaitos) päälle.

5.2.1 Kolmen paalin mittaustulokset

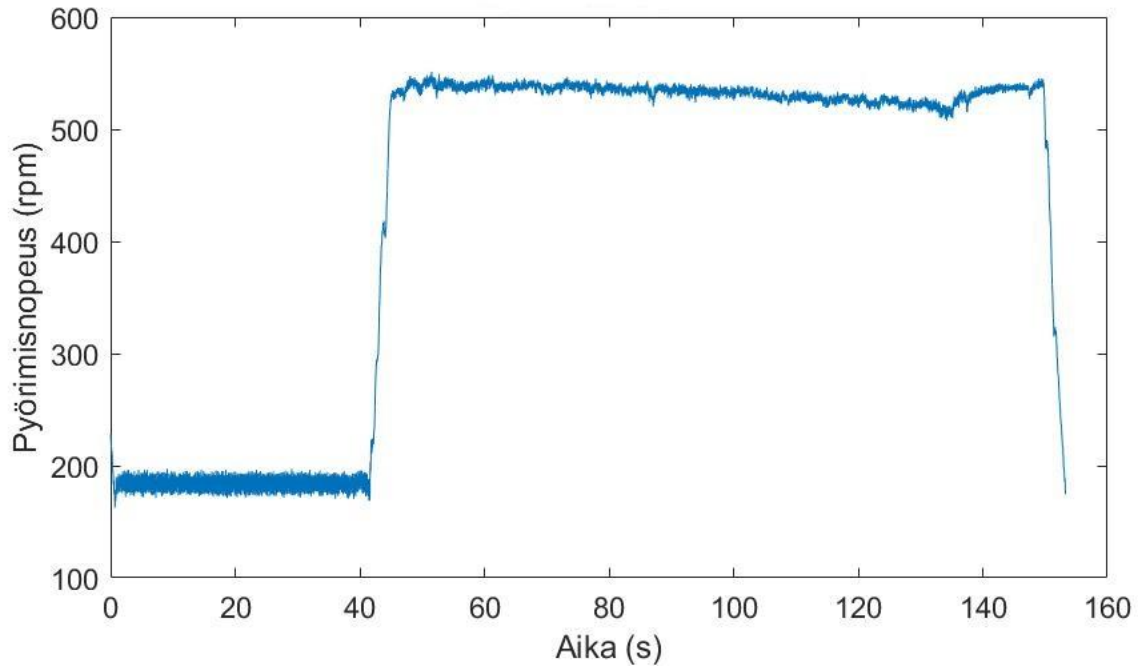
”Apilapellon” paalauksissa paalattiin yhteensä 97 paalia. Viimeinen paali oli kooltaan pienempi kuin muut paalit. Otimme lähempään tarkasteluun kolme satunnaisotannalla valittua paalia paalauksen eri vaiheista. Kyseiset paalit olivat paalausjärjestykseltään paalit numero 2, 32 ja 88.



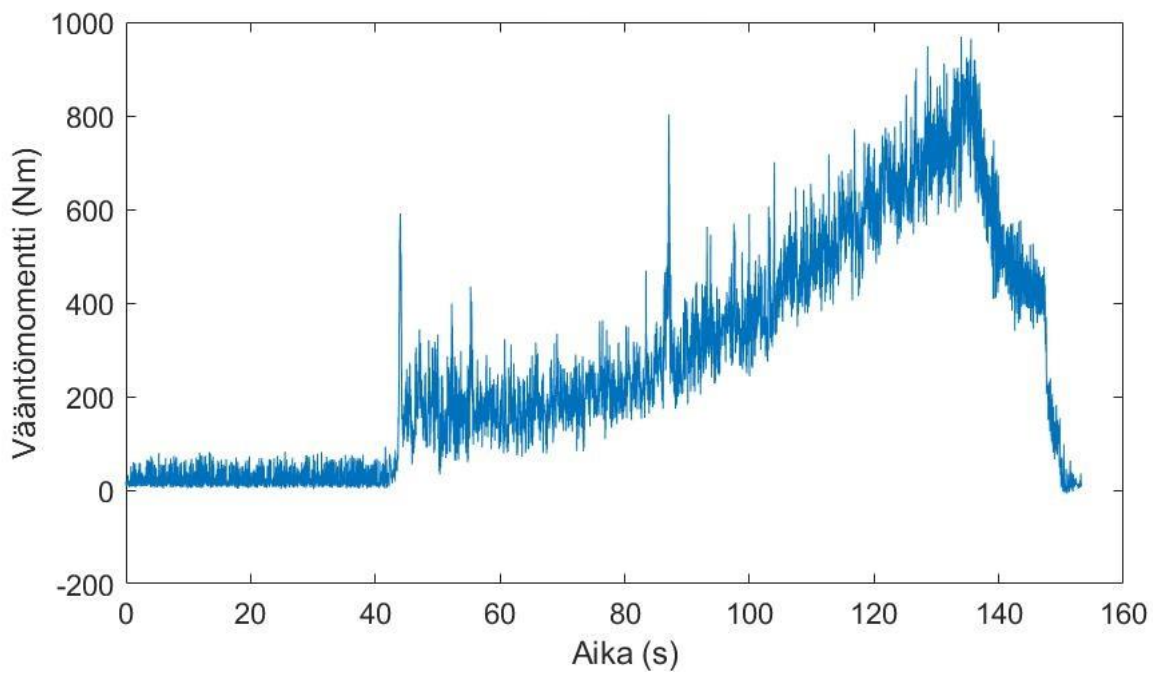
Kuva 15. Paalin numero 2 paalaamisen ajomatka merkitty sinisellä viivalla.

Kuvista 16 ja 17 voidaan todeta, että traktori on ollut paalin numero kaksi paalauksen alussa jonkin aikaa tyhjäkäynnillä paalain päällä ennen liikkeelle lähtöä. Tästä johtuu kuvien vasemmassa reunassa oleva tasaisempi alue ennen paalauksen aloitusta. Vääntömomentin käyrästä (kuva 17) nähdään paalin massan kehittyminen paalaimen kammiossa vääntömomentin käyrän nousuna. Mitä enemmän paalissa on massaa, sitä suuremman väännön paalain vaati traktorilta. Vääntömomentin kuvaajasta (kuva 17) voidaan silmämääräisesti huomata noin 88 sekunnin kohdalla terävä piikki, jossa vääntömomentti nousee äkillisesti noin 800 Newtonmetriin. Tämä voi selittyä esimerkiksi nurmi-

karheessa olleella paksummalla heinätupolla, joka sai aikaan äkillisen vääntömomentin kasvun aiheuttaen vastusta kulkeutuessaan paalaimen terien läpi.

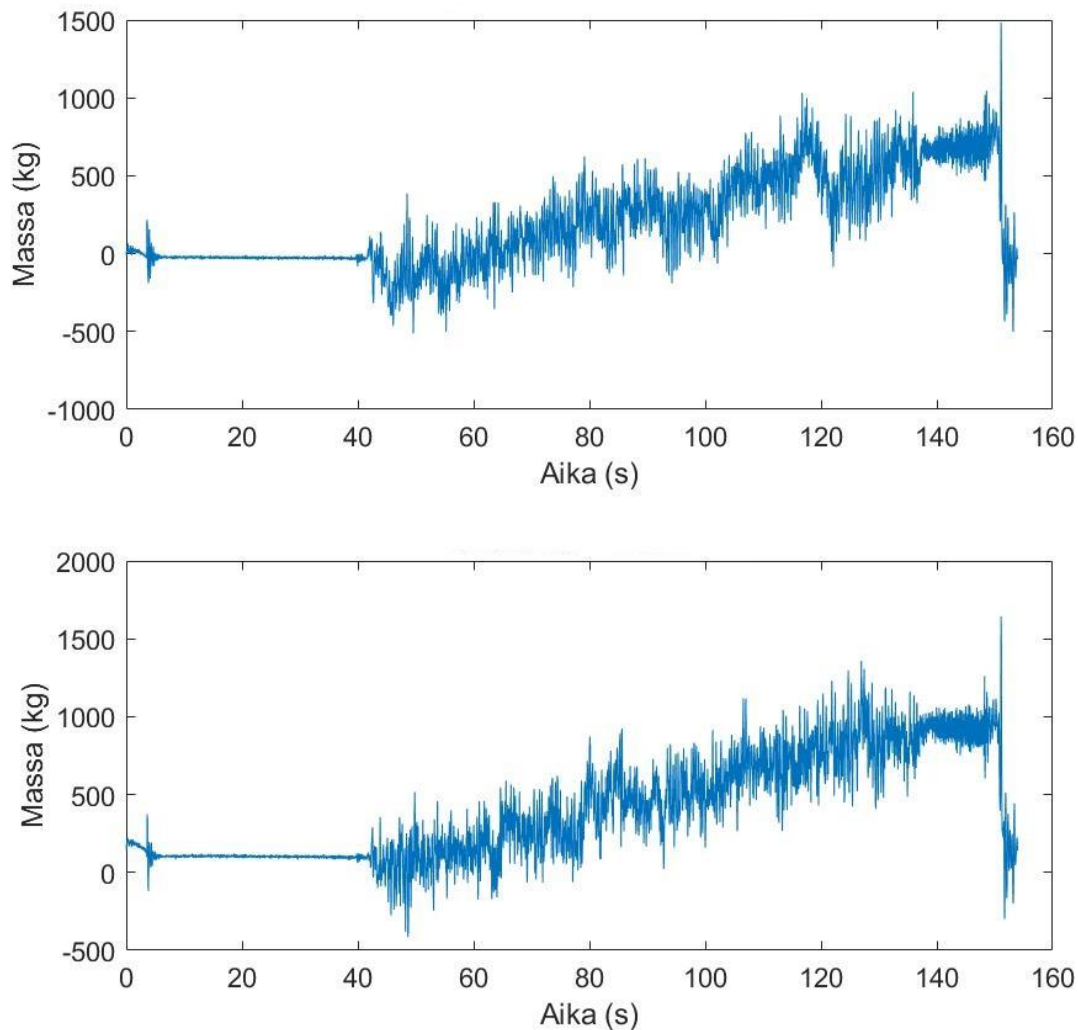


Kuva 16. Paalin numero 2 nivelakselin pyörimisnopeus paalauksen aikana.



Kuva 17. Paalin numero 2. vääntömomentti paalauksen aikana.

Kuvasta 18 voidaan havaita paalin massan kasvaminen paalauksen aikana. Alkutilanteessa paalin massa on lähellä nollaa, ja liikkeelle lähdön jälkeen kuvaajissa on havaittavissa noususuuntainen käyrä. Tasaisempi kohta mittauksen lopussa, noin 140 sekunnin kohdalla, aiheutuu traktorin paikallaan seisomisesta paalin verkotuksen aikana. Traktorin liikkuminen pellolla aiheuttaa pomppimista paalaimessa, mikä aiheuttaa paljon vaihtelua painon mittaustulokseen. Tarkimpaan punnitustulokseen päästään laskemalla paalin painon keskiarvo verkotuksen ajalta. Tätä tutkimusta varten rakennetulla mittausjärjestelmällä mitattuna paalin painoksi saatiin 726 kiloa. Puntarilla mitattuna paalin massa oli 762 kiloa. Erilaisten mittaustapojen välinen ero oli 36 kiloa, eli punnittu massa oli 4,7 % mittalaitteella mitattua suurempi.

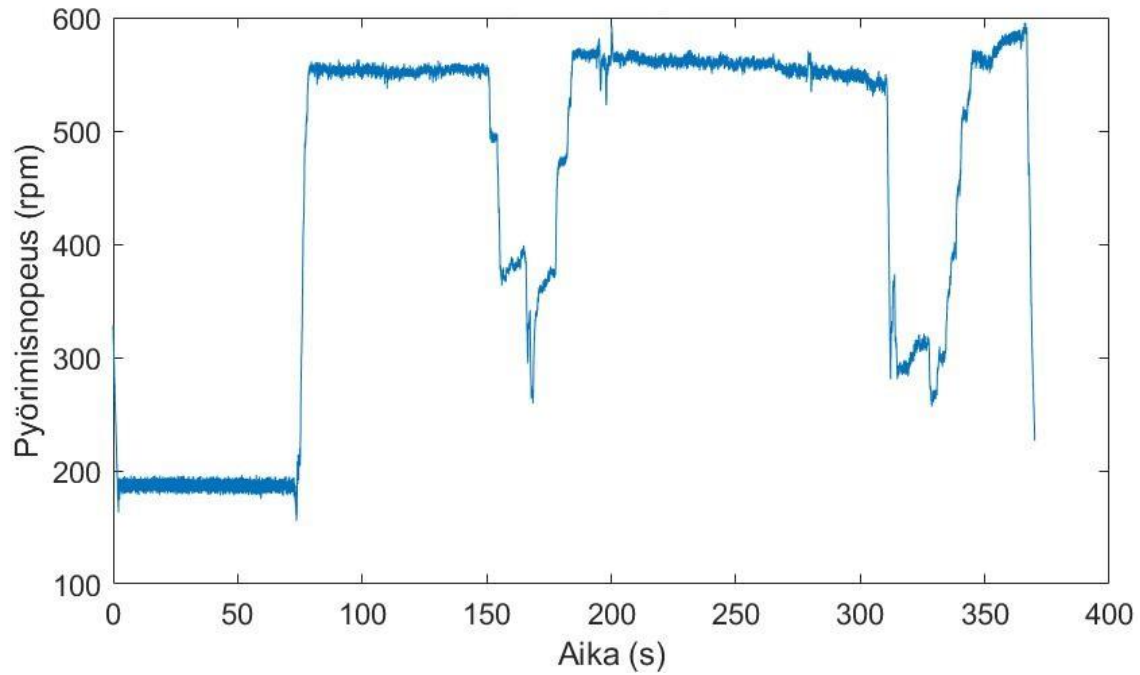


Kuva 18. Paalin numero 2 venymäliuskojen punnitustulokset paalauksen aikana. Ylemmässä kuvaajassa on vasemman puolen venymäliuskojen tiedot ja alemmassa kuvaajassa oikean puolen tiedot.

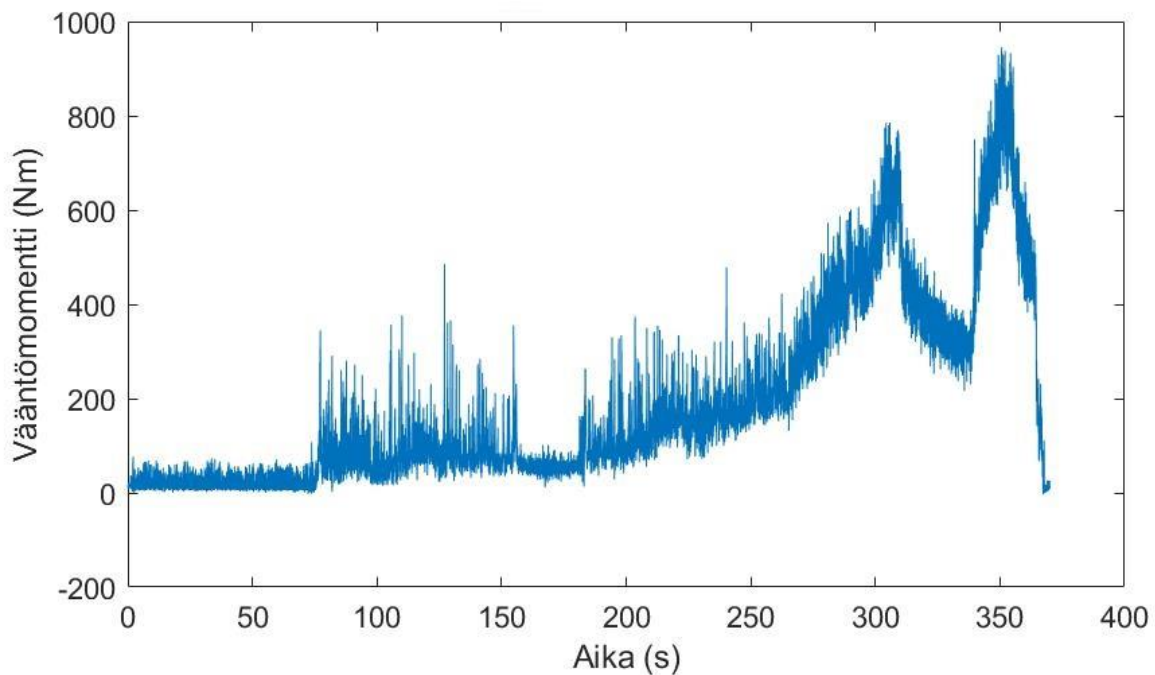
Paalin numero 32 tuloksista (kuvat 20, 21 ja 22) nähdään paalin muodostuminen paalaimessa sekä lisäksi päisteisiin saapuminen ja kuljettajan ajotyö. Kuvasta 20 nähdään nivelakselin kierrosluvun alenevan kahdessa kohtaa noin 150 sekunnin ja 320 sekunnin kohdalla. Näissä kohdissa traktori saapui päisteeseen ja kuljettaja käänsi traktorin seuraavalle karheelle (kuva 19). Kuljettaja alensi päisteessä traktorin moottorin kierrosnopeutta, jolloin myös paalaimen nivelakselin pyörimisnopeus laski. Sama nopeuden tippuminen voidaan havaita venymäliuskoilla mitatuista hetkellisesti tasaisemmista punnitustuloksista (kuva 22).



Kuva 19. Paalin numero 32 paalaamisen ajomatka merkitty sinisellä viivalla.



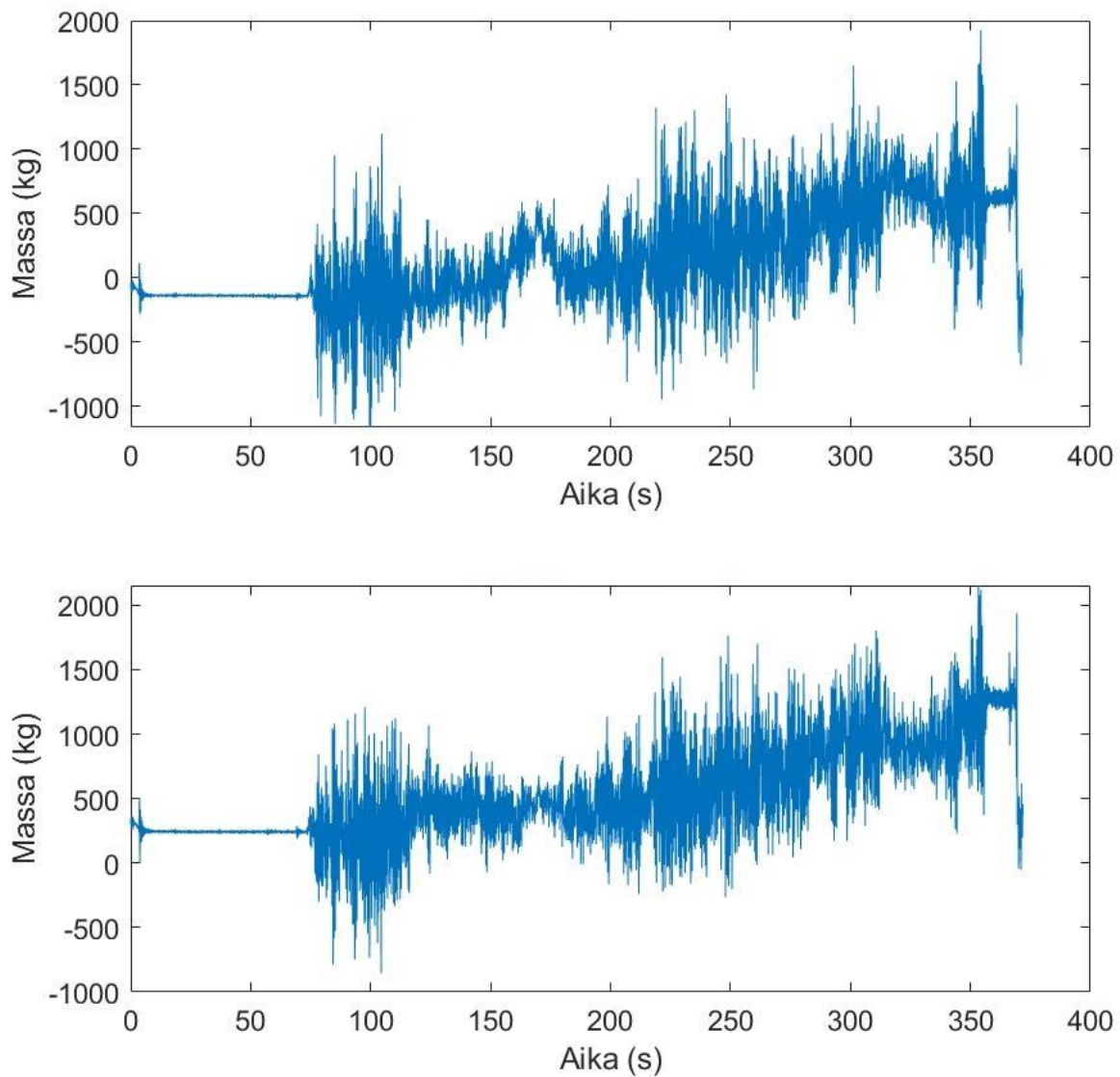
Kuva 20. Paalin numero 32 nivelakselin pyörimisnopeus paalauksen aikana.



Kuva 21. Paalin numero 32 vääntömomentti paalauksen aikana.

Venymäliuskojen mittausta kuvaavasta kuvasta (kuva 22) voidaan havaita antureiden mittaustulosten huomattavaa vaihtelua. Traktorin paikalla ollessaan (ensimmäiset 60 sekuntia) käyrä on tasainen, mutta liikkeelle lähdön jälkeen on havaittavissa suurta muutosta arvoissa. Mitta-anturit ovat

hyvin herkkiä ja mittaavat pienintäkin muutosta akselin taipumisessa. Tämän takia paalaimen pomppiminen pellon epätasaisella pinnalla näkyy mittaustuloksissa suurena vaihteluna. Rakennetulla mittaajajärjestelmällä mitattuna saatiin paalin painoksi 849 kiloa. Puntarilla mitattuna paalin paino oli 904 kiloa. Erilaisten mittaustapojen välinen ero oli 55 kiloa. Puntarilla saatu punnitustulos oli 6,1 % suurempi kuin mittalaitteilla mitattu paalin massa.

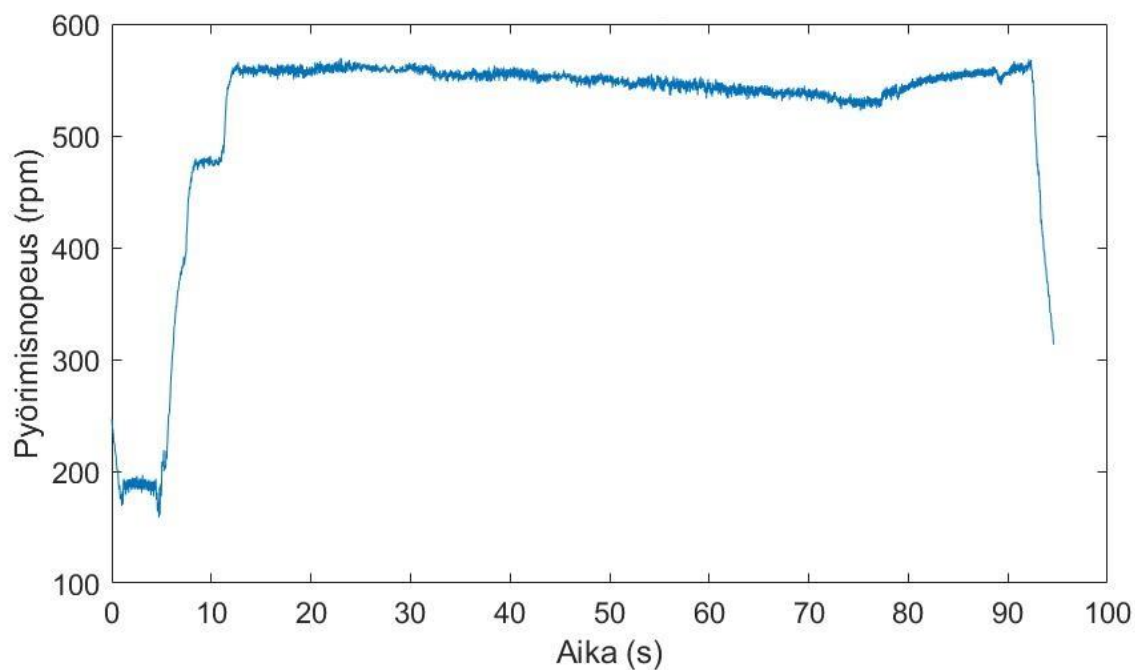


Kuva 22. Paalin numero 32 venymäliuskojen punnitustulokset paalauksen aikana. Ylemmässä kuvaajassa on vasemman puolen venymäliuskojen tiedot ja alemmassa kuvaajassa oikean puolen tiedot.

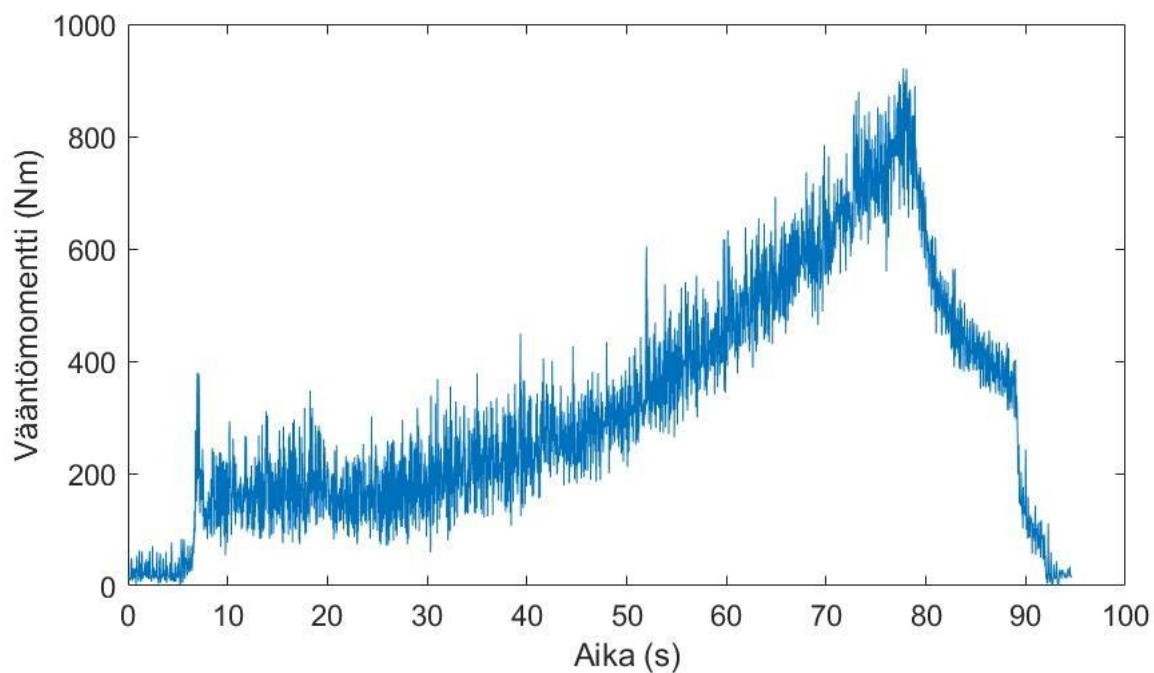
Paalin numero 88 paalaus sujui mittaustulosten mukaan hyvin. Pyörimisnopeus ja vääntömomentti (kuvat 24 ja 25) kuvaavat uskottavasti paalin muodostumista. Kuvassa 24 voidaan havaita paalin massan kasvu ja sen vaikutus traktorin moottorin kierroslukuun. Nivelakselin pyörimisnopeus laskee tasaisesti paalin massan kasvaessa, jolloin traktori joutuu kovemmalle rasitukselle ja ulosoton pyörimisnopeus hidastuu traktorin moottorin kierrosnopeuden laskiessa. Pellon tässä osassa (kuva 23) karheet olivat paksummat kuin esimerkiksi paalin 32. kohdalla ja paalit muodostuivat nopeasti. Tämä voidaan havaita vertailtaessa paalien 2, 32 ja 88 paalaamiseen kulunutta aikaa ja kuljettua matkaa. Paalin numero 32 kohdalla ajettiin pellon keskiosassa, jossa valkoposkikihanhien laiduntaminen oli aiheuttanut mittavia satotappioita.



Kuva 23. Paalin numero 88 paalaamisen ajomatka merkitty sinisellä viivalla.



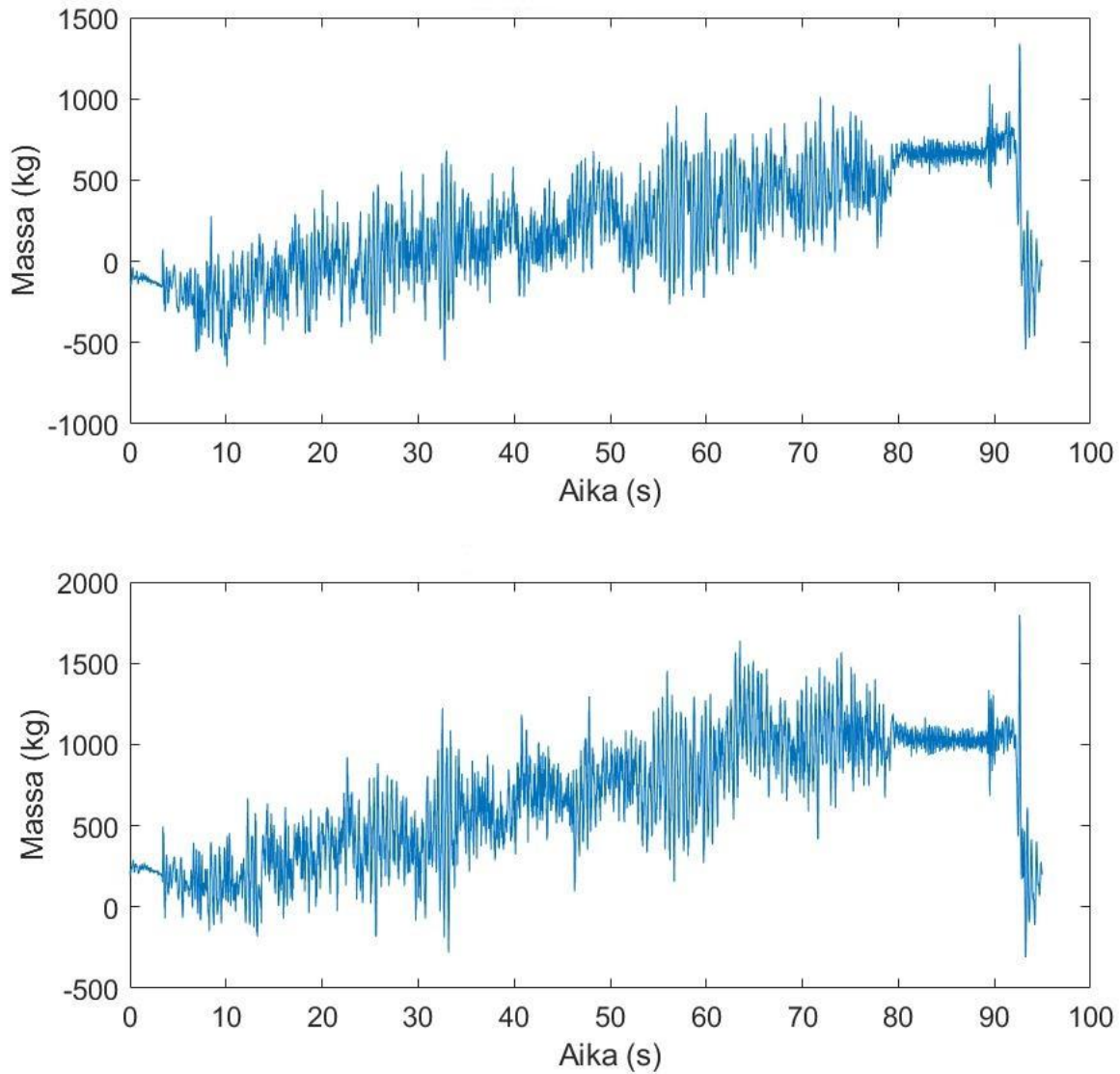
Kuva 24. Paalin numero 88 nivelakselin pyörimisnopeus paalauksen aikana.



Kuva 25. Paalin numero 88. vääntömomentti paalauksen aikana.

Kuvassa 26 on kuvattuna paalin numero 88 muodostuminen. Paalin massaksi saatiin rakennetulla mittausjärjestelmällä mitattuna 807 kiloa ja punnituksessa 794 kiloa. Erilaisten mittaustapojen väli-

nen ero oli 13 kiloa. Puntarilla saatu punnitustulos oli 1,7 % pienempi kuin mittalaitteilla mitattu paalin massa.

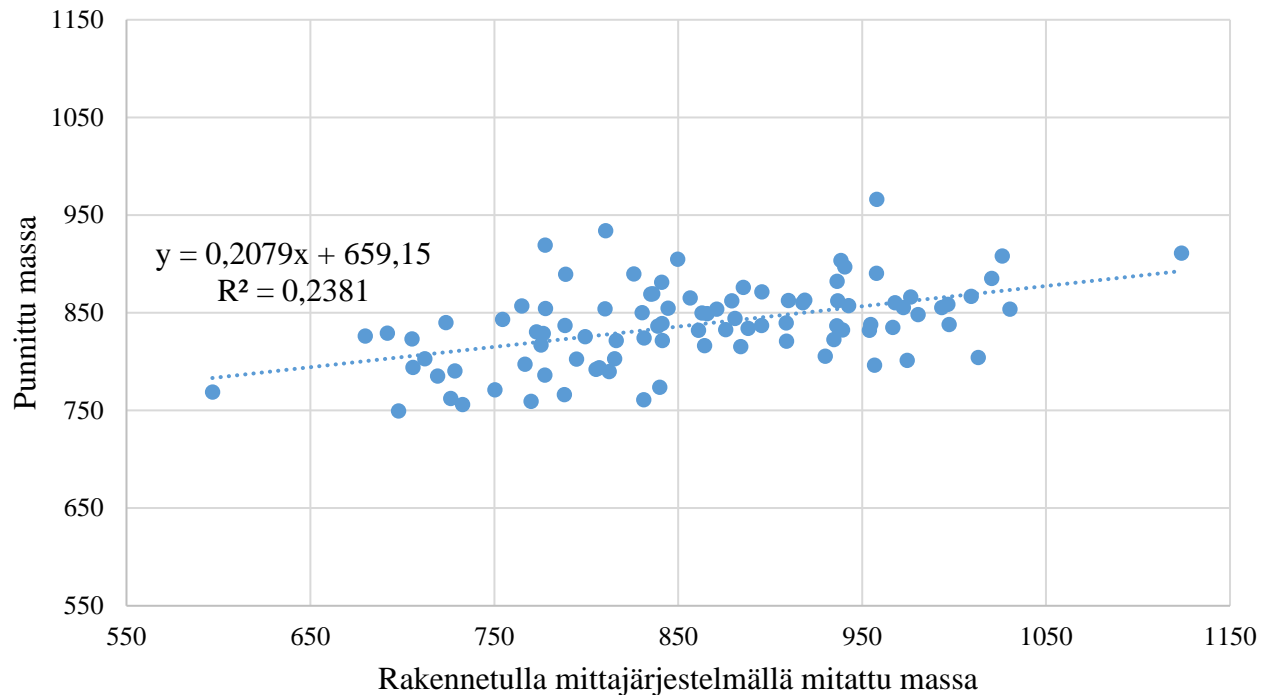


Kuva 26. Paalin numero 88 venymäliuskojen punnitustulokset paalauksen aikana. Ylemmässä kuvaajassa on vasemman puolen venymäliuskojen tiedot ja alemmassa kuvaajassa oikean puolen tiedot.

5.2.2 Kaikkien punnittujen paalien mittaustulokset

Kuvassa 27 on piirrettynä rakennetulla mittausjärjestelmällä mitattujen massojen ja punnittujen massojen tulokset. Tulosten mukaan punnittujen ja mitattujen massojen välillä on jonkin verran

eroa. Paalien massojen erot vaihtelivat -213 kg ja +172 kg välillä. Keskiarvoisesti punnitustulosten ero oli -20,5 kg, mikä tarkoittaa sitä, että punnitut massat olivat keskiarvoisesti 20,5 kg pienempiä kuin mitatut massat. Keskihajonta oli 85,5 kg. Alhainen selitysaste $R^2=0,2381$, tarkoittaa sitä, että mitattu ja punnittu massa erosivat toisistaan melko paljon.



Kuva 27. Puntarilla punnittujen ja rakennetulla mittausjärjestelmällä mitattujen massojen korrelaatio. Kuvasta on poistettu viimeinen vajaaksi jäänyt paali.

Punnitustuloksista -10 % ja +10 % hajonnan välillä oli 61 paalia, eli 63 % kaikista punnituista paaleista. -5 % ja +5 % välillä oli 35 paalia, eli 36 % kaikista punnituista paaleista. Punnituista paaleista 7 kappaletta (7 %) oli -1 % ja 1 % välillä.

5.2.3 Traktorin tehontarve

Traktorin ja paalaimen väliin asennetun vääntömomenttianturin avulla pystyttiin mittaamaan nivelselän pyörimisnopeus ja vääntömomentti. Saatujen mittauksien avulla pystytään laskemaan traktorin paalaukseen tarvitsema teho. Tehontarve kuvastaa työtä, jonka traktorin moottori joutuu tekemään paalauksen aikana. Jos tarkastellaan paalin numero 88 muodostumista, vääntömomentin

kuvaajasta (kuva 25) voidaan silmämääräisesti arvioida suurimmaksi mitatuksi vääntömomentiksi noin 800 newtonmetriä. Samalla ajanhetkellä (noin 79 sekuntia) voidaan nivelakselin pyörimisnopeuden kuvaajasta (kuva 24) silmämääräisesti arvioida nivelakselin pyörimisnopeudeksi noin 530 kierrosta minuutissa. Saatujen arvojen avulla voidaan kaavaa 2 hyödyntämällä laskea traktorin paalaukseen tarvitsemaksi tehoksi noin 44,4 kilowattia. Hevosvoimiksi muutettuna tämä on noin 60.4 hevosvoimaa.

(2)

$$P = T * \omega$$

Jossa

P = teho (W)

T = vääntömomentti (Nm)

ω = kulmanopeus (rad/s)

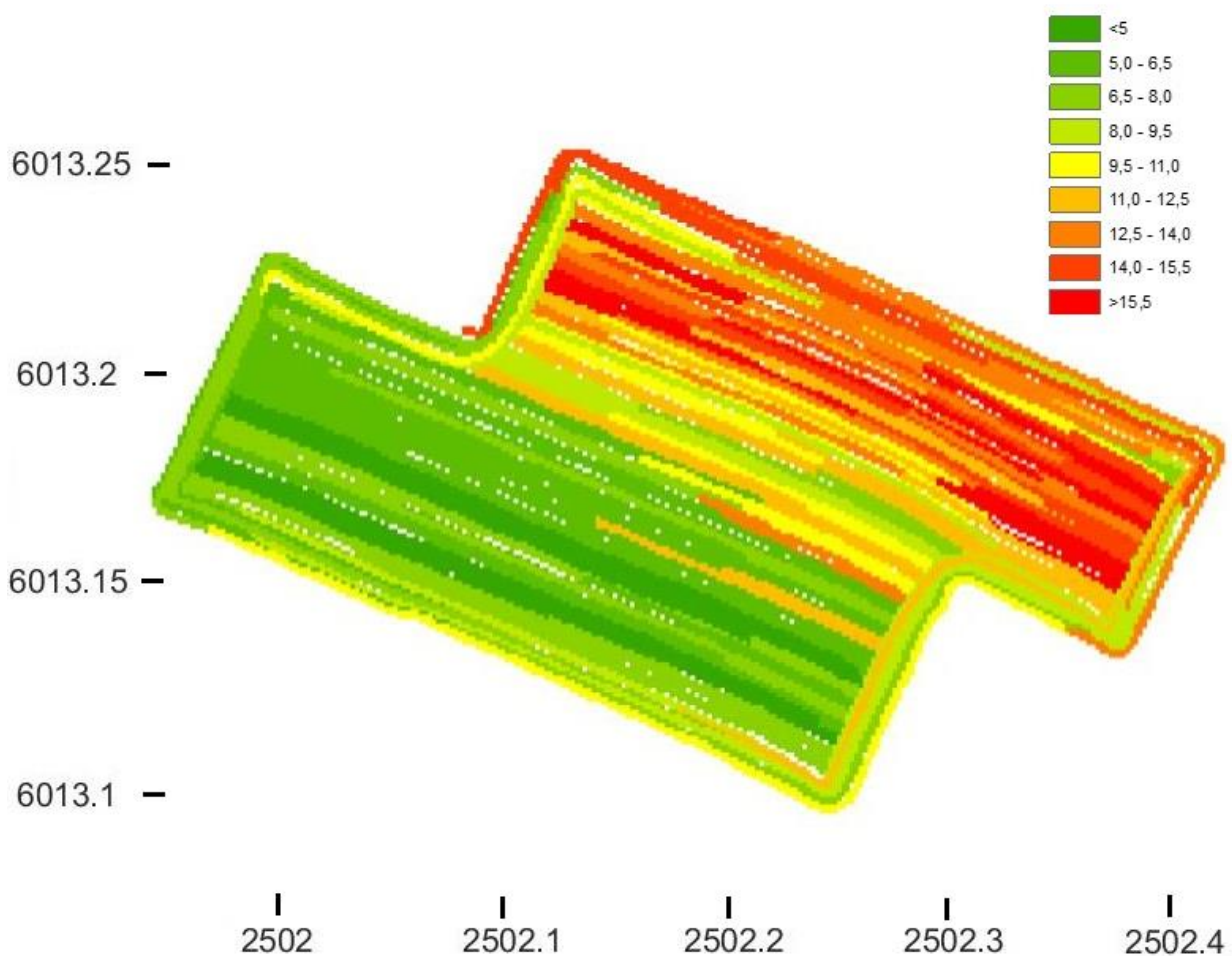
Todellisuudessa traktorilta vaaditaan enemmän tehoa kuin pelkästään 60 hevosvoimaa. 60 hevosvoimaa riittää pelkän paalautapahtuman suoritukseen, mutta traktori tarvitsee moottoritehoa myös pellolla liikkumiseen. Yhteenlaskettu tehontarve on näin ollen suurempi kuin 60 hevosvoimaa.

5.3 Satokartta 12.8.2015 paalatulle nurmisadolle

”Apilapellon” paalauksessa paalatut 97 paalia piirrettiin satokartoiksi (kuvat 28 ja 29). Satokartan (kuva 28) piirtämiseen käytettiin hyödyksi rakennetulla mittausjärjestelmällä saatuja paalien massoja. Satokartasta on selvästi huomattavissa pellon alueelliset satotasojen erot. Pellon alalaidassa on ollut merkittävästi huonompi sato kuin pellon ylälaidassa. Tämä johtuu mittavista hanhituhoista. Hanhet olivat syöneet suuren osan pellosta lähes kokonaan ja tältä alueelta saatiin kerättyä huonompaa satoa kuin pellon ylälaidasta. Satokartassa olevat valkoiset alueet johtuvat laskentatavasta ja GPS-anturin antamien tulosten tarkkuudessa tapahtuvista poikkeamista. Satokartan piirtämisessä käytetty niittokoneen työleveys rajoittaa kahden vierekkäisen karheen välisen alueen täyttymistä, jos GPS-anturin signaali ei ole ollut tarkka. Jos karheiden etäisyys toisistaan on suurempi kuin niittokoneen työleveys, on siihen kohtaan jäänyt valkoinen alue. GPS-anturin signaali on saattanut

myös olla paikoitellen epätarkka (yli 10 senttiä) jolloin valkoiset alueet muodostuvat herkemmin. Satokartan piirtämisessä on käytetty 1,6 x 1,6 metrin ruutukokoa.

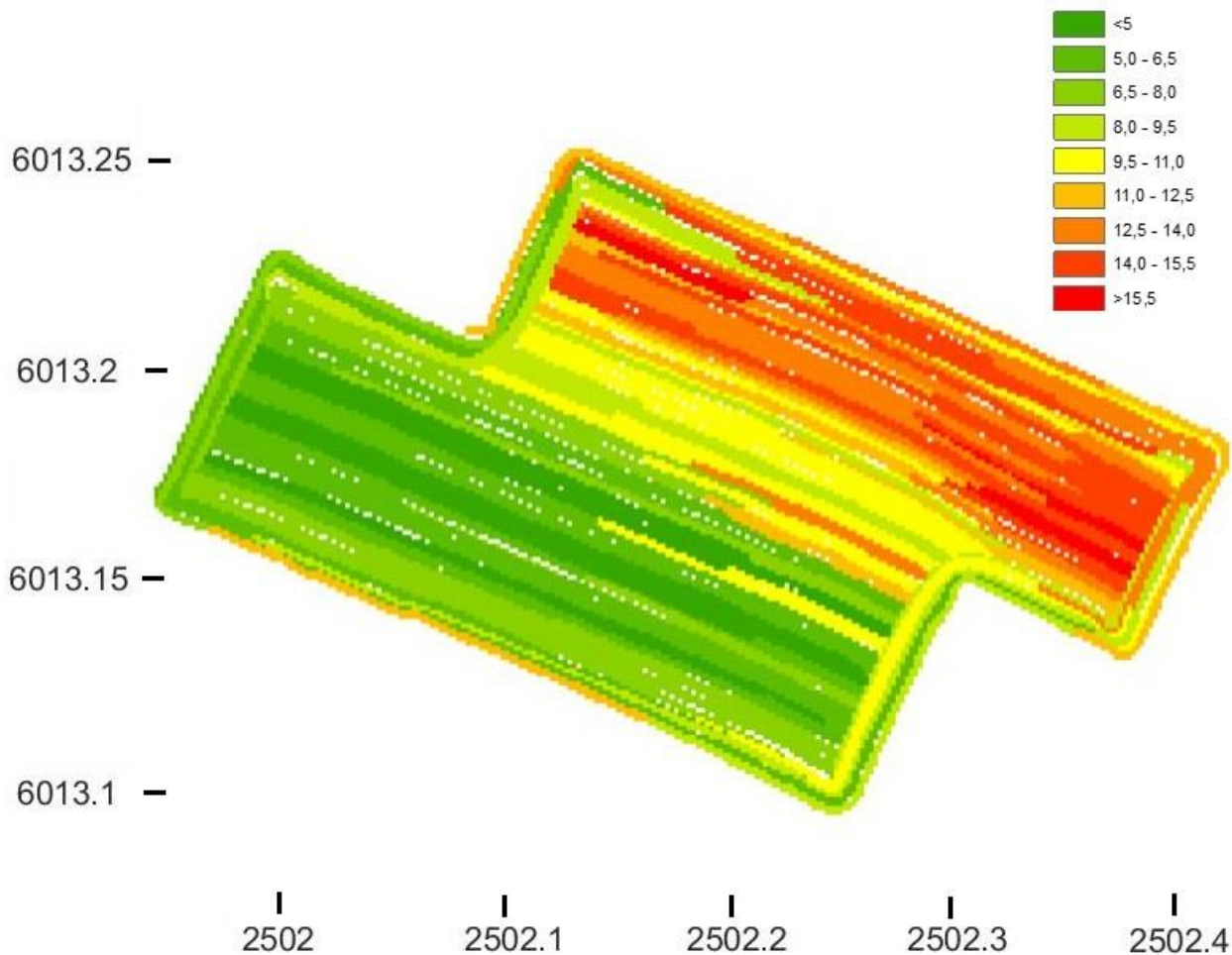
97 paalin tarkastelussa paalatuista paaleista paalin numero 2 paalaukseen ajettu matka oli noin 150 metriä. Tästä kertomalla niittokoneen työlevydeillä saadaan paalatuksi pinta-alaksi noin 471 neliometriä. Paalin painon ollessa mittalaitteilla mitattuna noin 726 kiloa, saadaan hehtaarisadoksi 15,4 t/ha. Saatu hehtaarisato oli tuorepainona, eli rehusadosta ei ole otettu kosteusarvoja, joiden avulla kuiva-ainesato olisi voitu laskea.



Kuva 28. Mittalaitteilla mitattujen paalien massojen satokartta. Selitteessä rehusadon määrä tonneina/hehtaari tuoresatona.

Toinen satokartta (kuva 29) on piirretty käyttäen hyödyksi puntarilla punnittuja paalien massoja. Eri mittaustulosten avulla piirrettyjen satokarttojen välillä ei ole suurta eroa, mutta pieniä eroja on ha-

vaittavissa. Kuvien selitysasteet ovat samat. Mittalaitteilla punnittujen paalien satokartassa (kuva 28) on havaittavissa enemmän punaista väriä kuin puntarilla punnittujen paalien satokartassa. Punainen väri kuvastaa suurempaa satoa. Yli 15,5 tonnin hehtaarisatoa näyttäisi silmämääräisesti tarkastelemalla olevan enemmän mittalaitteilla mitattujen massojen satokartassa.



Kuva 29. Puntarilla punnittujen paalien massojen satokartta. Selitteessä rehusadon määrä tonneina/hehtaari tuoresatoa.

5.4 Tulosten tarkastelu

Käytimme paalin painon määrittämisessä samoja menetelmiä kuin Wild ja Auernhammer (1999). Molemmissa tutkimuksissa käytettiin paalaimen akseliin kiinnitettyjä venymäliuskoja mittaamaan paalin painoa. Wild ja Auernhammer (1999) käyttivät lisäksi voima-anturia mittaamaan paalaimen vetoaisaan kohdistuvaa painoa. Tässä tutkimuksessa ei otettu aisapainoa huomioon, sillä sen mittaamiseen olisi tarvittu oma anturi. Kolmas mittauspiste olisi auttanut paalin painon määrittämisessä

erityisesti ajettaessa epätasaisilla alustoilla. Näin olisi saatu tarkempia punnitustuloksia ajettaessa mäkisillä pelloilla. Viikin koetilan pellot olivat kuitenkin suhteellisen tasaisia, ja näin ollen aisapainon punnitus ei oletettavasti olisi tuonut suurta lisäarvoa.

Valmiin paalin verkotusta varten paalaimen päällä olevaa verkkorullaa ja sen muuttuvaa painoa ei huomioitu mittauksissa. Verkkorullan painon mittaaminen olisi vaatinut ylimääräisen anturin punnitsemaan jäljellä olevaa verkkoa. Yhteen paalin käytetty verkon määrä on massaltaan vähäinen joten saavutettu hyöty olisi ollut pieni.

5.4.1 Mittalaitteiston luotettavuus

Rakennetulla mittalaitteistolla mitatut punnitustulokset erosivat puntarilla punnituista tuloksista jonkin verran. Enimmillään paalien painot olivat puntarilla punnittuna 213 kiloa pienempiä tai 172 kiloa suurempia mittalaitteilla punnittuihin verrattuna. Tämä vaihteluväli oli suuri, ja sen pienentäminen oli haasteellista. Suuren vaihteluvälin takia todellisen rehumassan määrittäminen ei onnistunut kovin luotettavasti. Tuloksen tarkkuuteen vaikutti venymäliuskojen sijoittelu ja niiden kiinnittäminen. Antureiden vielä huolellisemmalla asennuksella olisi voitu vähentää virheen mahdollisuutta. Tässä tutkimuksessa yhtä paalia lukuun ottamatta kunkin paalin eri mittaustavoilla saatujen painojen erot olivat $\pm 25 \%$ sisällä. Wild ja Auernhammer (1999) pääsivät omassa tutkimuksessaan $\pm 10 \%$ tarkkuuteen pelto-olosuhteissa, korjattuaan kalibrointiaan. Meidän tutkimuksessamme $\pm 10 \%$ tarkkuuteen päästiin 63 %:lla paaleista. 10 % virhe tarkoittaa noin 88 kilogramman virhettä paalin massassa tässä tutkimuksessa.

5.4.2 Mittalaitteiden kehittäminen

Kesäisin nurmipelloilta niitetään yleisesti kahdesta kolmeen satoa. Viikin opetus- ja tutkimustilalla kesällä 2015 rehua korjattiin kaksi satoa, osittain noukinvaunulla laakasiiloihin ja osittain pyöröpaa-leihin. Mittausten kannalta tämä tarkoitti sitä, että paalain oli vaihtelevasti käytettävissä mittalaitteiden kiinnitystä ja testausta varten. Ensimmäiseen rehusatoon mennessä oli saatu kehiteltyä mittalaitteiden ensimmäinen versio, joka osoittautui epätarkaksi kokonaisuudeksi tutkimuksen kannalta. Mittalaitteiden hienosäätöön oli varattu aikaa vain rehusatojen välinen aika. Tänä aikana mittalaitteiden säätäminen oli hankalaa, sillä paalain käyttäytyy eri lailla staattisessa tilassa konehallissa

kuin pellolla paalauksen aikana. Varmuus mittalaitteiden toiminnasta saatiin vasta seuraavassa rehunkorjuussa. Käytännössä mittalaitteiden säätämislle olisi tarvittu enemmän aikaa.

Mittalaitteiden toiminnan varmuutta olisi voitu parantaa kiinnittämällä vielä enemmän huomiota venymäliuskojen asennukseen. Tarkempi asennus olisi antanut tarkemman tuloksen paalaimen akselin taipumisesta. Lisäksi venymäliuskojen mittaustaaajuus ei ollut riittävä. Tutkimuksen alussa käytetty yhden hertsin mittaustaaajuus ei riittänyt. Kesän aikana venymäliuskoja mittaava dataloggeri vaihdettiin. Käytettävissä olevista vaihtoehtoista ei löytynyt laitetta, jolla taajuutta olisi saatu nostettua yli 80 hertsin. Tästä syystä venymäliuskoilla käytettiin 80 hertsin mittaustaaajuutta. Muissa tutkimuksissa (Wild ym. 1994, Wild 1998, Wild ja Auernhammer 1999) on käytetty datan keräämiseen 200 hertsin mittaustaaajuutta. Mittaustaaajuuden nostamisella saadaan vähennettyä tärinästä johtuvia mittauspiikkejä. Näin saataisiin häiritsevää kohinaa vähennettyä punnituksen ajalta. Paalin tarkemman punnituksen aikaansaamiseksi olisi voinut käyttää myös kolmatta punnituspistettä paalaimen vetoaisalla. Tällöin koneen painopisteellä ei olisi vaikutusta paalin punnituksen tulokseen.

5.4.3 Satokartta

Satokartan muodostamista varten tarvitaan sadon määrä, korjuukoneen työleveys, työkoneen nopeus ja työkoneen sijainti (Digman ja Shinnars 2012). Näiden mittaustietojen avulla voidaan selvittää pellon satotasojen vaihtelua ja tuottaa saaduista tuloksista visuaalinen kartta havainnollistamaan satotasoja. Tässä tutkimuksessa pystyttiin selvittämään kaikki edellä mainitut asiat ja näin muodostamaan mittauksista satokartta. Tutkimuksessa laadittujen satokarttojen tarkkuus ei yllä kaupallisten sovellusten tasolle, mutta antaa silti hyvän kuvan pellon kasvukunnosta. Satokarttojen tietoja hyödyntämällä voidaan tutkia mahdollisia syitä pellon satotasojen vaihtelulle.

Yksi tärkeimmistä asioista miksi halutaan punnita pellolta korjatun sadon massaa, on satokarttojen luominen. Satokarttojen avulla saadaan pellon kunnosta tärkeää tietoa. Tunnettujen satotasojen avulla voidaan piirtää satokartta, joka kuvaa viljelijälle visuaalisesti pellon kuntoa. Visuaalisesta kuvasta on helpompi havaita pellon ongelmakohtia. Pellon kuntoon vaikuttaa monet tekijät ja vaihtelevat satotasot voivat viitata pellolla vallitseviin ongelmiin. Ongelmat voivat olla pellon rakenteelliset heikkoudet, kuten notkopaikat joihin vesi voi kerääntyä ja tukahduttaa kasvillisuutta tai muuten huono vesitalous, jolloin pelto on liian märkää hyvälle kasvustolle. Pellossa voi olla myös muita ongelmia kuten ravinnepuutoksia. Ravinnepuutoksiin viljelijä pystyy vaikuttamaan kasvukauden aikana täydennyslannoituksilla, mutta sitä tarvitsevan alueen selvittäminen on vaikeaa ilman kun-

nollista mittaustietoa pellostä. Satokartat muodostetaan sadonkorjuun aikana kerättävästä mittaustietä kuten sadon hetkellisestä painosta, kosteudesta ja sijaintitiedoista. Satotasojen avulla nähdään mitkä alueet pellostä tuottavat parempaa satoa. Nurmenviljelyssä tästä on hyötyä, jos esimerkiksi ensimmäisen rehusadon kohdalta muodostetuista satokartoista huomataan heikompaa kasvustoa jossain kohtaa peltoa. Tällöin lannoitusta kohdentamalla voidaan saada aikaan paremmat satotasot seuraavaan rehunkorjuuseen.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia, pystytäänkö erilaisia antureita hyödyntämällä mittaamaan pyöröpaalien painoa paalauksen aikana pelto-olosuhteissa. Antureiden avulla pystyttiin tallentamaan pellolta korjatun rehusadon tietoja ja tulkitsemaan saaduista tiedoista rehusadon kilomäärä paalikohtaisesti. Samalla saatiin tietoa traktorin tehontarpeesta paalauksen aikana. Tuloksia hyödyntämällä pystyttiin luomaan satokartta kuvaamaan pellon satotasojen vaihtelua.

Tutkimuksessa käytetyt venymäliuskat osoittautuivat hyväksi keinoksi mitata muodostuvan paalin massaa. Venymäliuskojen asentaminen paalainlaitteistoon onnistuu myös jälkikäteen, jolloin vältytään paalaimen suuremmilta rakenteellisilta muutoksilta. Käytännössä laitteiden luotettavuus ja mitaustarkkuus vaatii kuitenkin tarkkoja mittalaitteita ja huolellista asennusta, jotta mittaustulokset olisivat riittävän tarkkoja. Tarkempien satotasojen määrittämiseksi paalain tulisi varustaa rehun kosteutta mittaavalla järjestelmällä. Näin rehusadosta saataisiin selville rehun kuiva-ainepitoisuus ja satotietoja pystyttäisiin hyödyntämään paremmin eläinten ruokinnassa.

Tutkimuksessa tarkasteltiin myös paalauksen vaikutusta traktorin tehonkäyttöön. Kiinteäkammiosella paalaimella paalattaessa tehontarve kasvaa paalin massan kasvaessa. Paalin lopullisessa tiivistymisvaiheessa traktorilta vaaditaan suurinta vääntömomenttia paalin tiivistyessä paalikammion rullia vasten. Tiiviit ja tukevat paalit säilyttävät rakenteelliset ominaisuutensa pitempään eivätkä menetä muotoaan yhtä helposti kuin löysät paalit. Hyvin muotonsa säilyttävien paalien käsittely ja varastointi on helpompaa.

Tulosten perusteella rakentamamme järjestelmä vaikuttaa mahdolliselta tekniikalta paalin punnitukseen. Laitteiston toimintavarmuutta pitäisi kuitenkin saada parannettua ja virhemarginaalia pienennettyä. Näin voitaisiin varmistua tulosten luotettavuudesta. Vaikka tulokset olivat hyviä, ei tarkkuus ollut riittävä saamaan tarkkaa tulosta koko vuoden rehusadosta. Epätarkat mittaustulokset johtavat myös satokartan virheellisyyteen. Tarkka satokartta antaa viljelijälle tarkemman kuvan pellon ra-

kenteesta ja kasvukunnosta. Mitä tarkempi satokartta saadaan aikaiseksi, sitä paremmin pystytään suunnittelemaan tulevia viljelytoimia kyseiselle lohkolle.

Tutkimuksessa rakennettu mittalaitteisto vaatii vielä kehitystä ollakseen kuluttajaystävällinen järjestelmä. Data keräämisen helpottamiseksi käyttöliittymän tulisi olla helppokäyttöinen. Tietokoneelle tallennettu data ja sen käsitteleminen myöhemmin paalausten jälkeen on työlästä, eikä anna viljelijälle tarkkaa kuvaa rehusadosta paalauksen aikana. Järjestelmä tulisi varustaa näyttölaitteella, joka näyttäisi reaaliajassa kuljettajalle paalattavan paalin massan. Tulokset tallentuisivat sitten yksittäisinä paaleina laitteen muistiin, jolloin yksittäisten paalien tarkasteleminen jälkikäteen tietokoneella olisi helpompaa. Tutkimuksessa nyt käytetty laitteisto tallensi kaikkien paalien punnitustiedot yhteen tiedostoon, josta ne manuaalisesti eroteltiin yksittäisiksi paaleiksi. Kaupallinen laitteisto tulisi varustaa myös järjestelmän taaraavalla toiminnolla. Paalauksen aikana paalaimen rungon päälle kerääntyy irtorehua, joka omalta osaltaan vääristää mittaustuloksia. Mittajärjestelmän taaraus mahdollistaisi tarkemmat punnitustulokset esimerkiksi peltolohkoa vaihdettaessa, jolloin aloitustilanteessa vaaka näyttäisi nollaa riippumatta rungon päälle kertyneestä rehumassasta. Taaraustoiminnolla voitaisiin nollata myös verkkorullan kulumisesta johtuvat massan muutokset. Markkinoilla olevissa paalaimissa ei vielä kovin monelta valmistajalta löydy pyöröpaalaukseen soveltuvaa punnituslaitteistoa. Tulevaisuudessa tekniikan kehittyessä sellaiset järjestelmät todennäköisesti ovat saatavilla useampiin paalaimiin.

LÄHTEET

- Ag Leader. 2017. Ag leader's industry-leading yield monitor simplifies collecting quality yield data. <https://www.agleader.com/blog/ag-leaders-industry-leading-yield-monitor-simplifies-collecting-quality-yie/>. Julkaistu 1.8.2017. Viitattu 16.11.2020.
- Claas. 2020. Jaguar ajosilppurit -tuotekuvasto.
<https://www.claas.fi/blueprint/servlet/blob/2235998/4f42942a8ffc407908f4d81a09ef0c01/396704-23-dataRaw.pdf>. Viitattu 16.11.2020.
- Digman, M. & Shinnars, K. 2012. Technology background and best practices: yield mapping in hay and forage. Proceedings, 2012 California Alfalfa and Grains Symposium. 6 s.
- Garmin GPS 18x technical specifications. 2011.
https://static.garmincdn.com/pumac/GPS_18x_Tech_Specs.pdf. Julkaistu 2011. Viitattu 13.10.2020.
- Grisso, R., Alley, M. & Groover, G. 2005. Precision farming tools: GPS navigation. Virginia Cooperative Extension Publication 442-501. 7 s.
- Heacox, L. 1998. Precision primer. American Vegetable Grower 46: 16-17.
- Heikkilä, T., Saarisalo, E., Jaakkola, S. & Taimisto, A.-M. 2008. Kuiva-ainepitoisuuden ja säilöntäaineen vaikutus pyöröpaalatun säilörehun laatuun ja maidontuotantoon. Suomen maataloustieteellisen seuran tiedote 23. 7 s.
- Hermann, J. 2013. Site-specific soil cultivation. Teoksessa: Hermann, J. (toim.). Precision in crop farming. Springer Science+Business Media. s. 143-170.
- Hoffmann K. 1986. Applying the Whetstone bridge circuit. Hottinger Baldwin Messtechnik. 3. painos. 25 s.
- John Deere 2020. John Deere AG täsmäviljelyteknologia -tuoteopas.
<https://www.deere.fi/assets/publications/index.html?id=0a59e3ad#1>. Julkaistu 2020. Viitattu 16.11.2020
- Karttunen, J. 2019. Automaatiotekniikka maataloilla – yleisyys, hyödyt ja haasteet. Työtehoseuran julkaisu 437. 6 s.

- Koivuviita, K. 1997. Ohjaustekniikka: Anturitekniikan perusteet, anturit ja kenttälaitteet. Ammat-
ti-instituutti Helsinki. Suomen Eduserver ky. 32 s.
- Krone tuotemallisto FI 2012/13. <https://www.hankkija.fi/Liitetiedostot/Docs/9krone-tuotemallisto-puhdas.pdf>. Julkaistu 2012. Viitattu 13.10.2020.
- Kroulík, M., Mašek, J., Kvíz, Z., Jošt, B. & Prošek, V. 2011. Sensors connection for yield deter-
mination on round balers with variable chamber. Research in Agricultural Engineering 57: 51-
55.
- Lehtonen, S. 2019 Kolmas säilörehusato pelasti paljon. Maaseudun tulevaisuus 103: 10.
- Loftis, P. J., Kirk, K. R., Mueller, J. D. & Andrae, J. G. 2019. Development of a round bale
weighing system for spring-loaded bale ramps. Applied Engineering in Agriculture 35: 969-
977.
- Luonnonvarakeskus Luke 2020 – Satotilasto, sato ja viljasadon laatu. Viljelykasvien sato.
<http://stat.luke.fi/satotilasto>. Julkaistu 28.8.2020. Viitattu 10.11.2020.
- Maanmittauslaitoksen avoimen tietoaaineiston Nimeä CC 4.0 -lisenssi.
<https://www.maanmittauslaitos.fi/avoindata-lisenssi-cc40>. Ortoilmakuvat ladattu 18.4.2020.
- New Holland Agriculture. 2017. Farm with precision with New Holland.
<https://assets.cnhindustrial.com/nhag/nar/en-us/assets/pdf/precision-land-management/precision-land-management-brochure-us-en.pdf>. Julkaistu 2017. Viitattu 16.11.2020.
- Näsi, R., Viljanen, N., Kaivosoja, J., Alhonoja, K., Hakala, T., Markelin, L. & Honkavaara, E.
2018. Estimating biomass and nitrogen amount of barley and grass using uav and aircraft
based spectral and photogrammetric 3D features. Remote Sens. 10: 32 s.
- Pesonen, L., Kaivosoja, J. & Suomi, P. 2010. Täsmäviljely ja ravinteiden käytön tarkentaminen.
Teho-hankkeen julkaisuja 5. 56 s.
- Rains, G. & Thomas, D. 2009. Precision farming: an introduction. University of Georgia. 12 s.
- Rinne, M., Pitkänen, T., Nyholm, L., Nousiainen, J. & Huhtanen, P. 2010. Nurmiheinien ensim-
mäisen sadon sulavuuden ja sadon määrän mallit nurmirehuntuotannon hallintaan. Suomen
maataloustieteellisen seuran tiedote 26. 9 s.

- Singh, M., Kumar, R., Sharma, A., Singh, B. & Thind, S. 2015. Calibration and algorithm development for estimation of nitrogen in wheat crop using tractor mounted n-sensor. The Scientific World Journal 2015. 12 s.
- Tuure, V.-M. & Suomi, P. 2008. Maatalouskoneiden viljelijää palveleva automaatio. TTS tutkimuksen tiedote. Luonnonvaara-ala: maatalous. 608: 6 s.
- Wild, K. 1998. Satellitengestützte arbeitszeiterfassung und ertragsermittlung in rundballenpressen. Ph. D. thesis. Institut für Landtechnik der Technischen Universität München in Weihenstephan. 250 s.
- Wild, K. & Auernhammer, H. 1999. A weighing system for local yield monitoring of forage crops in round balers. Computers and Electronics in Agriculture 23: 119-132.
- Wild, K., Auernhammer, H. & Rottmeier, J. 1994. Automatic data acquisition on round balers. Institut für Landtechnik der Technischen Universität München in Weihenstephan. 16 s.

LIITE 1. VENYMÄLIUSKOJEN KALIBROINNIN TULOKSET

Anturin lukemiksi käytettiin 200 mittauksen keskiarvoja. Mitattu paino kuvastaa keulapainojen todellista punnittua massaa. Jokainen keulapaino punnittiin erikseen ja jokaisen painon nimellisarvo oli 60 kg.

Nimellispaino kg	Mitattu paino kg	Oikea anturi (mV)	Vasen anturi (mV)
0	0	-1,612	-0,767
60	64,3	-1,632	-0,786
120	120,3	-1,650	-0,803
180	179,2	-1,668	-0,821
240	236,0	-1,683	-0,839
300	301,7	-1,705	-0,861
360	360,7	-1,723	-0,878
420	416,7	-1,740	-0,895
480	475,7	-1,759	-0,913
540	532,4	-1,777	-0,929
600	596,5	-1,797	-0,952
660	655,8	-1,815	-0,969
720	712,2	-1,833	-0,987
780	771,5	-1,851	-1,005
840	830,5	-1,869	-1,024

LIITE 2. OHJELMAKOODI MITTAUSDATAN KERÄÄMISEKSI

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.IO.Ports;
using System.IO;
using System.Threading;
using Agtek.LabJack;
using System.Threading.Tasks;

namespace Paalikone
{
    class Program
    {
        static void Main(string[] args)
        {
            LabJackCR M4 = new LabJackCR(); //Luodaan uusi LabJack muuttuja.

            //Luodaan jokaiselle kerättävälle datalle omat tiedostot, joihin data tallennetaan.
            StreamWriter Paalit = File.CreateText(@"C:\Documents and Settings\Asentaja\desktop\Paalailua
            \Data\Patteripelto.txt");
            Paalit.AutoFlush = true;

            StreamWriter GPS_text = File.CreateText(@"C:\Documents and Settings\Asentaja\desktop\Paalailua
            \GPS\Patteripelto.txt");
            GPS_text.AutoFlush = true;

            StreamWriter Paino = File.CreateText(@"C:\Documents and Settings\Asentaja\desktop\Paalailua
            \Paino\Patteripelto.txt");
            Paino.AutoFlush = true;

            //Kirjoitetaan tiedostojen ensimmäiselle riville otsikot.
```

```

Console.WriteLine("Time\tRPM\tTorgue\tChamper");
Paalit.WriteLine("Time\tMilliseconds\tRPM\tTorgue\tChamper");
Paino.WriteLine("Time\tMilliseconds\tRight\tLeft");

SerialPort GPS = new SerialPort("com8"); //Määritetään sarjaportti, josta ohjelma tunnistaa GPS-anturin.
GPS.BaudRate = 4800; //Asetetaan BaudRate.
GPS.Open(); //Avataan GPS-anturi tietojen lukemista varten.

    //Määritetään vasemman ja oikean puolen mantracourteille sarjaportit, josta ohjelma löytää venymä-
    //liuskat.
SerialPort Mantra_Right = new SerialPort("com30", 115200, Parity.None, 8, StopBits.One);
Mantra_Right.Open();

SerialPort Mantra_left = new SerialPort("Com29", 115200, Parity.None, 8, StopBits.One);
Mantra_left.Open();

    //Luodaan erilaisia muuttujia tietoja varten.
double RPM_V;
double Torgue_V;
double Champer;
string GPS_data;
string L_Mantra;
string R_Mantra;

    // Eri while-loopit mahdollistavat eri toiminnallisuuksien toteutuksen rinnakkain. Task - komennon
    // avulla voidaan luoda useita rinnakkaisia toimintoja, jotka saadaan toimimaan yhtä aikaa. Jokaisen
    // loopin sisällä ollaan pysähdyksissä eri aika, jolloin saadaan erilaiset mittaustaajuuudet aikaan.

Task task_1 = new Task(() =>
{
    while (true)
    {
        DateTime time = DateTime.Now;
        GPS_data = GPS.ReadLine();
        GPS_text.WriteLine("{0}\t{1}", time, GPS_data);
        //Tallennetaan mittaustulokset aiemmin luotuihin tiedostoihin.
        Console.WriteLine(GPS_data);
    }
});

task_1.Start();

Task task_2 = new Task(() =>
{
    while (true)
    {
        DateTime Aika = DateTime.Now;
        Mantra_Right.Write("!001:SYS?\r");
        R_Mantra = Mantra_Right.ReadTo("\r");

        Mantra_left.Write("!001:SYS?\r");
        L_Mantra = Mantra_left.ReadTo("\r");

        Paino.WriteLine("{0}\t{1}\t{2}\t{3}", Aika, Aika.Millisecond, R_Mantra, L_Mantra);
    }
});

task_2.Start();

    while (true)
    {
        DateTime Kello = DateTime.Now;
        RPM_V = M4.Read(LabJackChannel.AI1);
        Torgue_V = M4.Read(LabJackChannel.AI3);
        Champer = M4.Read(LabJackChannel.AI2);

        Paalit.WriteLine("{0}\t{1}\t{2}\t{3}\t{4}", Kello, Kello.Millisecond, RPM_V, Torgue_V, Champer);
        Thread.Sleep(25); //Aika millisekunteina, joka odotetaan ennen seuraavaa mittausta.
    }
}
}
}

```

LIITE 3. PUNNITTUJEN JA MITATTUJEN PAALIMASSOJEN TULOKSET

12.8.2015 KORJATULLE NURMIREHUSADOLLE

Paalin numero	Vasen venymäliuska			Oikea venymäliuska			Mitattujen arvojen keskiarvo	Punnittu massa	Erotus
	Alkumassa	Loppumassa	Paalin massa	Alkumassa	Loppumassa	Paalin massa	Vasen ja oikea		
1	-297,3	763,8	1061,1	2,0	967,0	965,0	1013,0	804,2	-208,8
2	-6,4	686,3	692,6	152,3	912,2	759,9	726,3	762,3	36,0
3	-53,5	647,8	701,3	126,6	1167,0	1040,4	870,8	853,8	-17,0
4	-176,4	874,3	1050,7	251,3	1261,1	1009,8	1030,3	853,7	-176,6
5	49,6	520,9	471,3	333,7	1392,1	1058,5	764,9	856,9	92,0
6	-153,6	736,0	889,6	337,7	1099,8	762,1	825,8	889,8	64,0
7	-174,4	930,2	1104,6	157,7	1071,5	913,8	1009,2	866,7	-142,5
8	87,6	766,2	678,7	147,2	1023,5	876,4	777,5	919,2	141,7
9	-136,8	723,9	860,6	43,8	1169,5	1125,7	993,2	855,4	-137,8
10	-127,1	712,9	840,1	256,9	1098,7	841,8	840,9	881,3	40,4
11	-181,1	724,6	905,8	125,2	1036,5	911,3	908,5	839,7	-68,8
12	-105,8	729,6	835,4	160,6	1206,2	1045,6	940,5	896,9	-43,6
13	-124,3	809,9	934,2	258,1	1200,6	942,6	938,4	903,5	-34,9
14	-75,4	606,4	681,8	163,2	1113,6	950,5	816,1	821,6	5,5
15	-150,6	823,2	973,8	193,5	1104,8	911,3	942,6	857,1	-85,5
16	-72,9	867,5	940,5	209,6	981,9	772,3	856,4	865	8,6
17	8,0	776,7	768,8	83,7	1085,3	1001,7	885,2	876,1	-9,1
18	-113,1	571,7	684,7	152,1	1137,3	985,1	834,9	869	34,1
19	-204,2	575,3	779,5	185,3	1278,4	1093,1	936,3	882,1	-54,2
20	-234,5	968,2	1202,7	276,6	1006,9	730,3	966,5	835,1	-131,4
21	64,0	676,3	612,2	174,1	1070,8	896,6	754,4	843,3	88,9
22	-163,6	680,6	844,1	218,5	995,4	776,9	810,5	934,1	123,6
23	-235,2	476,0	711,1	-6,1	1195,9	1202,0	956,6	796,4	-160,2
24	-254,7	758,1	1012,8	324,3	888,0	563,7	788,3	836,9	48,6
25	-40,7	663,1	703,8	-1,1	1247,7	1248,8	976,3	866	-110,3
26	-170,7	846,3	1017,0	295,0	876,6	581,6	799,3	825,6	26,3
27	-4,6	659,1	663,7	44,0	1141,9	1097,9	880,8	844	-36,8
28	-76,9	661,1	738,0	215,9	1199,5	983,7	860,9	832,1	-28,8
29	-125,0	626,7	751,7	290,7	1216,7	926,0	838,9	836,2	-2,7
30	-202,0	753,1	955,1	375,4	1472,5	1097,1	1026,1	908	-118,1
31	-130,6	745,1	875,7	451,4	1195,8	744,4	810,0	854	44,0
32	-91,1	626,7	717,8	294,1	1275,6	981,5	849,7	904,7	55,0
33	-257,1	705,4	962,5	286,4	984,3	698,0	830,2	850,2	20,0
34	-164,4	564,5	729,0	118,1	1061,0	942,9	836,0	869,4	33,4
35	-298,8	931,3	1230,2	133,5	1150,4	1016,9	1123,5	910,9	-212,6

36	13,3	522,6	509,3	181,4	1055,6	874,3	691,8	829,2	137,4
37	-199,2	769,7	969,0	196,4	1222,0	1025,6	997,3	837,9	-159,4
38	-43,6	692,2	735,8	331,2	991,3	660,1	697,9	749,4	51,5
39	-97,8	574,0	671,7	114,1	1200,5	1086,3	879,0	862,2	-16,8
40	-301,7	660,5	962,2	295,7	1170,9	875,3	918,7	862,9	-55,8
41	-166,0	866,9	1032,9	254,9	1137,7	882,9	957,9	966,2	8,3
42	-116,2	648,3	764,5	132,2	1096,3	964,0	864,3	816,4	-47,9
43	-133,8	666,4	800,2	249,2	1059,4	810,2	805,2	792,1	-13,1
44	-113,0	813,7	926,7	231,4	1265,2	1033,8	980,3	848,1	-132,2
45	-21,6	584,7	606,3	358,3	1329,6	971,2	788,8	889,5	100,7
46	-223,3	635,1	858,5	332,3	1007,2	674,9	766,7	797,4	30,7
47	-155,2	604,2	759,4	153,2	1184,5	1031,4	895,4	871,4	-24,0
48	-273,4	757,8	1031,2	255,5	1093,5	838,0	934,6	822,5	-112,1
49	-56,1	712,1	768,1	172,1	1155,2	983,2	875,6	832,7	-42,9
50	-97,6	578,7	676,3	293,6	1241,8	948,2	812,3	789,8	-22,5
51	-159,1	613,5	772,7	385,3	1022,9	637,6	705,1	823,1	118,0
52	-211,9	432,6	644,5	173,8	967,5	793,7	719,1	785	65,9
53	-310,6	849,3	1159,9	123,2	822,9	699,7	929,8	805,5	-124,3
54	22,5	607,4	584,9	25,6	1016,5	990,9	787,9	766,2	-21,7
55	-108,2	443,1	551,3	211,6	1200,0	988,4	769,8	759,4	-10,4
56	-335,0	633,2	968,2	412,2	1234,4	822,2	895,2	836,9	-58,3
57	-160,7	380,1	540,8	325,6	978,2	652,5	596,7	768,9	172,2
58	-321,8	601,5	923,3	119,9	1014,1	894,2	908,8	820,9	-87,9
59	-222,2	502,2	724,4	137,2	1075,2	938,0	831,2	760,8	-70,4
60	-184,5	644,5	829,0	271,9	993,5	721,6	775,3	816,8	41,5
61	-154,6	502,5	657,2	104,8	1130,0	1025,2	841,2	821,4	-19,8
62	-251,5	445,9	697,5	245,8	1013,6	767,8	732,6	756	23,4
63	-233,4	693,4	926,9	158,1	910,8	752,7	839,8	773,8	-66,0
64	-63,4	654,6	718,0	112,8	940,4	827,6	772,8	830,5	57,7
65	-129,6	585,4	715,0	11,0	1231,7	1220,7	967,8	860,3	-107,5
66	-206,3	531,4	737,7	283,0	1002,5	719,4	728,6	790,5	61,9
67	-282,5	608,1	890,6	217,7	1236,0	1018,3	954,5	838	-116,5
68	-172,0	684,1	856,0	316,0	1279,7	963,7	909,9	862,4	-47,5
69	-105,2	586,5	691,7	331,4	1051,1	719,7	705,7	793,9	88,2
70	-201,2	784,5	985,6	225,2	1112,8	887,6	936,6	862,3	-74,3
71	-31,4	665,2	696,6	146,8	1132,4	985,6	841,1	839	-2,1
72	-128,0	700,9	828,9	231,3	1347,1	1115,8	972,3	855,2	-117,1
73	-115,7	728,9	844,6	423,2	1304,3	881,1	862,9	849,7	-13,2
74	-90,3	642,1	732,4	350,6	977,8	627,3	679,8	826	146,2
75	-96,1	688,9	785,0	56,0	1311,5	1255,5	1020,3	885,1	-135,2
76	-184,8	558,8	743,6	360,8	1041,4	680,7	712,1	803	90,9
77	-216,6	445,6	662,2	222,3	1113,1	890,8	776,5	828,6	52,1
78	-313,5	756,6	1070,1	182,4	1105,1	922,8	996,4	858,7	-137,7

79	-63,2	764,3	827,5	159,1	1107,3	948,2	887,9	834	-53,9
80	-36,8	512,8	549,6	198,8	1096,4	897,6	723,6	840	116,4
81	-315,3	620,8	936,0	169,5	1182,2	1012,7	974,3	801,3	-173,0
82	-121,6	653,2	774,8	274,9	1162,9	888,0	831,4	824,2	-7,2
83	-126,2	507,7	633,9	264,5	1185,4	920,8	777,4	786,1	8,7
84	-251,1	759,0	1010,1	328,4	1196,9	868,5	939,3	832,3	-107,0
85	-27,9	634,7	662,6	212,7	1180,6	967,9	815,3	802,9	-12,4
86	-115,1	770,5	885,5	292,1	1138,0	845,8	865,7	849,2	-16,5
87	-103,5	686,4	789,8	270,1	1169,0	898,8	844,3	854,6	10,3
88	-136,2	666,1	802,4	214,2	1025,7	811,6	807,0	793,7	-13,3
89	-102,6	761,7	864,3	151,3	1159,3	1007,9	936,1	836,6	-99,5
90	-114,7	707,1	821,8	262,3	1208,4	946,2	884,0	815,4	-68,6
91	-125,2	705,9	831,1	332,1	1336,4	1004,2	917,7	860,3	-57,4
92	-93,3	673,5	766,7	389,7	1178,4	788,7	777,7	854,3	76,6
93	-141,0	662,7	803,7	235,3	1021,0	785,7	794,7	802,6	7,9
94	-191,6	731,2	922,8	141,6	1126,2	984,7	953,8	831,9	-121,9
95	-48,1	765,7	813,9	242,6	1344,2	1101,6	957,7	890,4	-67,3
96	-65,5	573,5	639,1	339,7	1201,1	861,3	750,2	771,1	20,9
97	-163,3	282,3	445,6	327,0	495,0	168,1	306,8	383,1	76,3

Keskiarvo -20,5

Keskihajonta 85,5